

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/001456

International filing date: 14 February 2005 (14.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE
Number: 10 2004 008 852.7
Filing date: 20 February 2004 (20.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 06 April 2005 (06.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 10 2004 008 852.7

Anmeldetag: 20. Februar 2004

Anmelder/Inhaber: Markus H u n d , 95447 Bayreuth/DE

Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung zur Probenbehandlung

IPC: H 05 H 1/46

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 3. März 2005
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Dzierzon

Verfahren und Vorrichtung zur Probenbehandlung

- Teil I: Verfahren und Vorrichtung zum Zünden und Betreiben von einem stationären oder beweglichen kleinen Plasma
- Teil II: Probenhalter mit integriertem Plasma
- Teil II: Flachspule zur Energieeinkopplung in eine Miniatur-Plasmakammer

Technisches Gebiet:

Plasmatechnik, Nanotechnologie, Mikroskopie, Rastersondenmikroskopie (SPM= scanning probe microscopy) und AFM (atomic force microscopy).

Teil I:

Verfahren und Vorrichtung zum Zünden und Betreiben von einem stationären oder beweglichen kleinen Plasma

Derzeitiger Stand der Technik und damit verbundene Nachteile

Derzeit erhältliche Plasmaätzanlagen sind für den stationären Betrieb und für große Proben (z. B. Siliziumwafer mit einem Durchmesser von 6 Zoll) und hohen HF-Leistungen (typisch: mehrere hundert Watt) dimensioniert. Es gibt eine Vielzahl von Verfahren zur Überwachung, Steuerung und Verbesserung von Plasmaprozessen. Die bekannten Vorrichtungen und Verfahren sind jedoch leider meist auf die Erfordernisse der Halbleiterindustrie zugeschnitten und beschäftigen sich oft mit Verbesserungen von Ätzprozessen im Hinblick auf die Halbleiterproduktion.

So spielt z. B. die so genannte Endpunktdetektion (end point detektion) eines Ätzprozesses in der Halbleiterindustrie eine wichtige Rolle, da von einer zu ätzenden Schicht eines Materials nicht zu viel entfernt werden soll (undercutting) und eine möglichst gleichförmige Ätzwirkung über eine große Fläche des zu ätzenden Materials erreicht werden soll. Verfahren und Vorrichtungen dazu sind z. B. in den Patentschriften US4263088, US6077387, EP0735565B1, DE19844882A1 und EP0768701A1 beschrieben. Im Gegensatz zu den meist für die Erfordernisse der Halbleiterindustrie beschriebenen Vorrichtungen und Verfahren geht es in der folgenden Erfindung allgemein um das Zünden und Betreiben von einem kleinen und vorzugsweise beweglichem Plasma, das in ein Gerät wie z. B. ein Mikroskop integriert wird. Die im folgenden beschriebene Vorrichtung und das Verfahren eignen sich insbesondere für die Steuerung, Regelung und Überwachung der beschriebenen Erfindung „Probenhalter mit integriertem Plasma“. Er ist vorzugsweise beweglich ausgeführt und kann z. B. in der Mikroskopie, insbesondere in der Rastersondenmikroskopie, eingesetzt werden.

Bei mikroskopischen Anwendungen spielt vorrangig die Reproduzierbarkeit der Plasmabehandlung eine entscheidende Rolle. Aus der Sicht des Plasmaprozesses wie z. B. eines Ätzprozesses ist es wichtig, eine Plasmabehandlung mehrmals reproduzierbar zu wiederholen. So ist es möglich z. B. an einer kleinen Fläche (z. B. $3\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m}$) der zu untersuchenden Probe eine bestimmte Schicht abzutragen oder andere Effekte zu induzieren. Für mikroskopische Anwendungen tritt die Forderung einer großflächigen homogenen Behandlung in den Hintergrund; die reproduzierbaren physikalischen und elektromagnetischen Parameter sind jedoch aus der Sicht des

Prozesses entscheidend wichtig. Wie in der Erfindung „Probenhalter mit integriertem Plasma“ ausgeführt, sollte die Plasmakammer im Mikroskop beweglich sein und ein Plasma sollte sicher und einfach mit möglichst wenig Leistung gezündet werden können. Die Plasmabehandlung muss für eine in der Plasmakammer befindliche Probe reproduzierbar, insbesondere bezüglich der applizierten Leistungen, sein.

Im einfachsten Fall geht es um ein stationäres kleines Plasma das gesteuert wird, vorzugsweise jedoch um ein kleines bewegliches Plasma mit einem Volumen von typischerweise 1 – 5 cm³. Aus der Sicht eines Operators z. B. eines Rastersondenmikroskops steht die einfache Benutzbarkeit von einem kleinen beweglichen Plasma im Vordergrund. Stand der Technik sind so genannte Chucks auf denen sich die zu untersuchende Probe befindet. Sie sind mit Hilfe von einer Steuerkugel (trackball) somit für den Operator in x- und y-Richtung frei beweglich (motorisiert). Alternativ können Steuerprogramme definierte Bewegungen ausführen (motorisiert).

Der beschriebene „Probenhalter mit integriertem Plasma“ ist vorzugsweise ebenfalls beweglich gestaltet, um die Benutzbarkeit so einfach wie möglich zu gestalten, wie z. B. die Wahl einer zu untersuchenden Stelle auf der Probe (Spot) und zum Probenwechsel. Der Operator kann mit dem „Probenhalter mit integriertem Plasma“ auf die gleiche Art und Weise, wie sie für viele erhältliche Rastersondenmikroskope, insbesondere Atomkraftmikroskope, Stand der Technik ist, die Probe und damit die Plasmakammer inklusive dem RF-Applikator, in der x- und y-Richtung frei im Mikroskop bewegen. Der Operator kann sich eine Stelle zur mikroskopischen Untersuchung wählen. Somit ist das kleine Plasma inhärent beweglich bezüglich des Mikroskops oder einzelnen Komponenten des Mikroskops. Der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ stellt eine allgemeine Lösung des technischen Problems dar, wie man eine aufwendige Repositionierung (relocation) einer Probe vermeiden kann, die z. B. plasmabehandelt werden muss, und eröffnet eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten insbesondere in der Rastersondenmikroskopie. Die Erfindung ist bezüglich der möglichen Anwendungen sehr vielseitig. Der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ stellt eine allgemeine Lösung des technischen Problems dar, wie eine Probe, einer in-situ Behandlung mit Plasmen, Gasen oder Flüssigkeiten bewerkstelligt werden kann. Es ist natürlich auch möglich die Probe nur elektrischen oder magnetischen Feldern auszusetzen. Vorteilhaft ist bei der Erfindung, dass die Sonde selbst, die zur mikroskopischen Untersuchung eingesetzt wird, nicht dem Behandlungsprozess ausgesetzt werden muss. Dies ist meist gewünscht, da der Abbildungsprozess selbst durch die veränderte Sonde verfälscht werden könnte. Ebenso kann der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ z. B. zur Mikroskopie von Plasmadepositionsprozessen verwendet werden. Der Probenhalter hat eine Schlüsselfunktion insbesondere dann, wenn:

1. Die zu behandelnde Stelle (Spot) der Probe schnell wiedergefunden werden soll (vorzugsweise automatisiert) und

2. die Sonde selbst nicht am Behandlungsprozess der Probe beteiligt sein soll oder darf.

So wäre es unerwünscht bei der Behandlung einer metallischen Probe mit einer Säure, die Sonde selbst der Säure auszusetzen, da eine Veränderung der Sonde einen Einfluß auf die Abbildung der Oberfläche hätte. Der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ kann mit Plasmen, Gasen oder Flüssigkeiten betrieben werden. Auch eine Behandlung der Probe mit elektromagnetischen Feldern wäre möglich. Neben prozessspezifischen Aspekten sind für den erfolgreichen Einsatz z. B. in der Rasterkraftmikroskopie folgende Eigenschaften eines solchen Systems nötig:

1. Die Benutzbarkeit und Handhabbarkeit des „Probenhalters mit integriertem Plasma“ sollte einfach sein.
2. Aus der Sicht des Prozesses soll die Behandlung reproduzierbar und sicher sein (Reproduzierbarkeit ist hierbei so zu verstehen, dass das Plasma-System eine mehrmalige Behandlung der Probe mit möglichst identischen physikalischen und elektromagnetischen Parametern ermöglichen muss.

Die beim „Probenhalter mit integriertem Plasma“ beschriebene Möglichkeit der schichtweisen Abtragung von Material einer Probe mit Hilfe einer Niederdruck-plasmabehandlung stellt hierbei nur eine Anwendung des „Probenhalters mit integriertem Plasma“ dar. Der Probenhalter könnte für neuartige dreidimensionale Abbildungsverfahren wie der Nanotomographie (EP1144989) eingesetzt werden. Der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ könnte dort eine Schlüsselkomponente darstellen, da aufgrund seiner speziellen Plasmakammergeometrie auf eine zeitaufwendige Repositionierung der Probe verzichtet werden kann. Somit wäre ein hohes Automatisierungspotential gegeben. Solche Abbildungsverfahren könnten in der Zukunft in Forschung und Industrie eine breite Verwendung finden. Insbesondere würde der Einsatz des „Probenhalters mit integriertem Plasma“ die Aquirierung von Bilddaten wesentlich beschleunigen, vereinfachen und automatisierbar machen. Zusätzlich stellt er insofern eine Schlüsselkomponente dar, als dass der Probenhalter in vorhandene Mikroskope integrierbar ist. Somit kann er erhältliche Mikroskope wie beispielsweise Atomkraftmikroskope in ihren mikroskopischen Möglichkeiten wesentlich erweitern und aufwerten. Bei den erhältlichen Plasmageräten wird die zu behandelnde Probe meist manuell in die Geräte eingebracht. Die Plasmakammer ist nicht beweglich sondern in die Geräte fest eingebaut. Die Anlagen besitzen teilweise folgende Eigenschaften [4-16]:

- Einstellbare Leistung, Probentemperatur und Prozesszeit,
- Gasfluss ist aus mehreren Teilgasflüssen verschiedener Gasarten mischbar,
- mikroprozessorgesteuerte Prozessschritte (komplexe Ätzprofile durch unterschiedliche Ätzraten),

- automatische Feinabstimmung der Impedanzanpassung (EP0840349A3, EP0911863A3),
- automatischer Probenwechsel,
- Ausstattung der Geräte mit Schnittstellen und Software zur Ansteuerung mit einem Host-Rechner,
- unabhängiges Einstellen von Prozessdruck und Gasfluss im Reaktor und
- Prozessüberwachung und Steuerung mit Hilfe von Plasmamonitor-Systemen.

Fig. 1 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau vieler erhältlicher Plasmasysteme bestehend aus RF-Generator 2, einem Anpassnetzwerk 4 (impedance matching network), einer Zuleitung 6 (nicht beweglich) einem Sensorsystem 10 zur Messung der reflektierten Leistung, einer optionalen Analyse-Einheit 12 (RF impedance analyzer) und einer Anwendung bestehend aus einer Plasmakammer 8 (stationär) mit einem so genannten RF-Applikator 14 (EP0911863A3, EP0840349A3). Der Applikator 14 sorgt für die Energieeinkopplung in die Plasmakammer und befindet sich in ihrer räumlichen Nähe oder kann in ihr integriert sein. Zur Überwachung des Ätzprozesses kann das System mit einem Plasmamonitor-System 18 ausgestattet sein. Plasmamonitor-Systeme beruhen auf der Optischen Emissionsspektroskopie (OES) und werten die optische Emission des Plasmas (meist 200 nm - 1000 nm) aus. Dazu wird an einem Fenster zur Plasmakammer (meist aus Glas) ein Sensor 22 zur Detektion von Licht angebracht. Dieser wird mit einem Lichtwellenleiter 20 mit dem Eingang des Plasmamonitors 18 verbunden. Die optimale Lichtintensität kann durch optische Abschwächer (Attenuator) eingestellt werden (keine Zeichnung). Plasmamonitore gibt es auch als PC-Einsteckkarten [3]. Der Host-Rechner 16 steuert das System und optional das Plasmamonitor-System. Meist sind alle Komponenten des Plasmasystems, außer dem Host-Rechner 16 und dem optionalen Plasmamonitor 18 in einem Gerät integriert. Meist ist die Zuleitung 6 vom Anpassnetzwerk 4 zum Applikator 14 nicht flexibel ausgelegt, da eine bewegliche Plasmakammer nicht vorgesehen ist. Manche Systeme verfügen optional auch über eine automatische Impedanzanpassung (automatic frequency tuning) an die Anwendung bestehend aus einer Plasmakammer 8 (stationär) mit einem RF-Applikator 14 (stationär) und einer Probe, die sich in der Plasmakammer befindet (nicht gezeichnet). Dazu wird die zu minimierende reflektierte Leistung der Anwendung mit einem Sensorsystem 10 gemessen, und in einer Analyseeinheit 12 automatisch ausgewertet. Die Ausgabe der Analyseeinheit 12 wirkt auf den RF-Generator 2 und/oder das Anpassnetzwerk 4 zurück und verbessert die Anpassung durch Veränderung von Parametern wie Frequenz, Leistung und anderer Parameter (EP0911863A3).

Stand der Technik ist weiterhin die Möglichkeit einer unabhängigen Einstellung des Prozessdruckes und des Gasflusses, der sich aus verschiedenen Teilgasflüssen zusammensetzen kann. Fig. 2 zeigt schematisch einen Gasflusscontroller 24, der die am Einlass der Plasmakammer 8 vorgeschalteten Gasflussregler 26 und 27 kontrol-

liert. Zwei unterschiedliche Gase aus den Gasvorratsbehältern 38 und 39 sind somit mischbar und stehen am Eingang der Plasmakammer 8 zur Verfügung. In Fig. 2 ist der Gasfluss gestrichelt gezeichnet. Die Zeichnung ist stark vereinfacht. Zur Übersichtlichkeit sind hier nur zwei mischbare Gase dargestellt und keine Belüftungsvorrichtungen (Ventile) dargestellt. Der Prozessdruck in der Plasmakammer 8 wird meist automatisiert eingestellt. Dazu wird die Saugleistung der Vakuumpumpe 32 mithilfe eines Druckcontrollers 28, der ein Steuerventil 29 (motorisiert) am Eingang der Vakuumpumpe kontrolliert. Die Druckmessung erfolgt mit Hilfe eines geeigneten Drucksensors 36. Typischerweise kontrolliert ein Steuerprogramm vom Host-Rechner 16 aus die vom Operator gewünschten Sollwerte, d. h. die Teilgasflüsse und den gewünschten Prozessdruck in der Plasmakammer, und macht die Istwerte des Prozesses wie Druck und Gasflüsse am Monitor vom Host-Rechner 16 sichtbar (nicht gezeichnet).

Wo liegt das Problem?

Das Problem liegt in der Konzeption und in der Dimensionierung der erhältlichen Anlagen bezüglich der stationären Betriebsweise, der Größe der Reaktoren und der applizierten großen Leistungen. Flexible, kleine Plasmaätzenanlagen mit einem Plasmavolumen von 1.0 bis 5 cm³ (Miniplasma) für Proben die typischerweise die Größenordnung von bis 1 Millimeter bis 2 Zentimeter aufweisen, und deren Plasmakammer beispielsweise in vorhandene Geräte wie Mikroskope integriert werden kann, und die vorzugsweise flexibel in verschiedenen Geräten verwendet werden können, sind im Handel nicht erhältlich. Neben speziellen geometrischen Anforderungen an kleine, bewegliche Plasmareaktoren bezüglich des Ätzverhaltens aber auch bezüglich späterer Mikroskopie von plasmabehandelten Proben, ist für die jeweilige Methode ein geeigneter Probenhalter mit einem geeigneten Grad der Miniaturisierung (siehe Probenhalter mit integriertem Plasma) sowie dafür geeignete RF-Applikatoren (siehe „Flachspule zur Energieeinkopplung in eine Miniaturplasmakammer“) nötig. Die in den Patentschriften US5401350 und DE69302029T2 beschriebenen induktiven RF-Applikatoren sind nicht für den „Probenhalter mit integriertem Plasma“ geeignet, da sie für die Verwendung in der Halbleiterindustrie konzipiert sind und mit mehreren hundert Watt Leistung betrieben werden und zur Behandlung von großen Proben beispielsweise Silizium-Wafer mit einem typischen Durchmesser von 6 Zoll verwendet werden. Der spezielle induktive RF-Applikator (siehe Flachspule zur Energieeinkopplung in eine Miniatur Plasmakammer) ist im Gegensatz dazu für die speziellen Anforderungen des „Probenhalters mit integriertem Plasma“ entwickelt worden. Im Gegensatz zu den beschriebenen RF-Applikatoren in US5401350 und DE69302029T2 handelt es sich um einen kleinen und flachen induktiven RF-Applikator mit einem für diesen Zweck entwickelten speziellen flachen Kondensator und einer flachen Spiralspule. Der beschriebene Applikator (siehe „Flachspule zur Energieeinkopplung in eine Miniaturplasmakammer“) kann mit

einem flexiblen Koaxialkabel (50 Ohm) betrieben werden. Induktive RF-Applikatoren werden meist zur Erzielung von einer isotropen Ätzwirkung eingesetzt. Neben diesen Plasmaprozessen wird beim Reactive-Ion-Etching-Verfahren (RIE) zusätzlich zur chemischen Ätzwirkung, noch ein Beschuß der Probe mit Ionen erreicht, um eine hohe Anisotropie zu erzielen. Dazu kann der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ auch alternativ zum induktiven RF-Applikator (siehe „Flachspule zur Energieeinkopplung in eine Miniatur-Plasmakammer“) mit einem speziell für den „Probenhalter mit integriertem Plasma“ geeigneten kapazitiven RF-Applikator betrieben werden. Da ein Niederdruckplasma bei einem typischen Druck von 1.0 mbar erst bei einigen 100 V zündet, wird ein Parallel-Resonanzkreis für die Erzeugung der hohen Spannungen verwendet. Zwischen dem Sender 40 (Fig. 3) und den Platten der Plasmakammer wird ein Übertrager (nicht gezeichnet) geschaltet. Der Antennenkopf mit Übertrager ist räumlich (größer als 1 m) vom Sender 40 getrennt. Das Anpassnetzwerk hat die Aufgabe die Ausgangsimpedanz des Senders an die Impedanz des Antennenkopfes mit Übertrager anzupassen. Der Antennenkopf mit Übertrager befindet sich in unmittelbarer Nähe der Plasmakammer, wobei er möglichst klein aufgebaut ist (Abmessungen: 55 mm x 75 mm x 30 mm, nicht gezeichnet) und eine RF-Abschirmung aufweist. Es handelt sich bei den Platten, die vorzugsweise aus Edelstahl oder Aluminium bestehen, beispielsweise um zwei planparallele quadratische (Abmessungen: 10 mm x 10 mm und 5 mm x 5 mm) oder runde Platten. Der Übertrager ist vorzugsweise mit einem flexiblen Koaxialkabel mit dem Anpassnetzwerk verbunden. Die Platten weisen je nach gewünschter Betriebsart (RIE oder RIE-PE-mode) die gleiche oder unterschiedliche Flächen auf. Neben der erforderlichen neuen Reaktorgeometrie (siehe „Probenhalter mit integriertem Plasma“) und der dazu geeigneten RF-Applikatoren, ergeben sich weitere, neue verfahrenstechnische Anforderungen an ein flexibles Plasmasystem. Diese Anforderungen hängen vom Grad der Miniaturisierung ab und sind bei erhältlichen Geräten derzeit nicht vorhanden:

1. Die Steuerung bzw. Regelung des Zündprozesses mit dem anschließenden Betrieb des Plasmas soll in unterschiedlichen Umgebungen und bei unterschiedlicher Beladung der Plasmakammer mit einer Probe zuverlässig arbeiten. Ein kleines Plasma ist bezüglich der Zündung und der Aufrechterhaltung sehr empfindlich: Bringt man beispielsweise ein leitfähiges Material in die Nähe eines kleinen Plasmas kann es dazu kommen dass es erlischt, weil in das eingebrachte Material nun Leistung eingekoppelt wird und die vorherige gültige Anpassung verändert wurde. Darüber hinaus kann das Einbringen einer leitfähigen kleinen Probe dazu führen, dass ein Plasma nicht mehr zündet, weil in die Probe selbst oder in das Trägermaterial der Probe, wie z. B. dotiertes leitfähiges Silizium, Energie eingekoppelt wird. In einer flexiblen Umgebung soll der „Probenhalter mit integriertem Plasma“ vom Operator frei in der x- und y-Richtung bewegt werden können um sich eine bestimmte Stelle (Spot) zur weiteren Untersuchung aussuchen zu können. Die Geometrie die der

„Probenhalter mit integriertem Plasma“ (und damit der in räumlicher Nähe zum Probenhalter befestigte RF-Applikator) zu Objekten eines Mikroskops, insbesondere eines Rastersondenmikroskops, einnimmt ist damit inhärent flexibel. Der in Fig. 3 dargestellte Atomkraftmikroskop-Kopf 47 mit einem Sondenhalter und einer Sonde ist typischerweise abgeschirmt und besteht zumindest teilweise aus leitfähigem Material. Selbst bei einer sehr guten Abschirmung 49 (vorzugsweise einem Faraday'schen Käfig) der beweglichen kleinen Plasmakammer 41 und/oder vom Mikroskop oder Teilen davon (nicht gezeichnet), erfordert eine Kontrolle ob der Plasmaprozess bei den vom Operator gewählten geometrischen Bedingungen (d. h. der Position der Plasmakammer 41 bezüglich des Atomkraftmikroskop-Kopfes 47) jeweils arbeitet, insbesondere dann, wenn möglichst kleine Leistungen appliziert werden sollen, um eine Zerstörung von empfindlichen Proben zu verhindern. Störfelder sind nicht völlig auszuschließen, zumal auch die Zuleitung 42 beweglich ausgestaltet ist und die Beladung der Plasmakammer ebenfalls variabel ist (unterschiedliche Probengröße, nicht gezeichnet). Für den „Probenhalter mit integriertem Plasma“ ist kann ein besonderer Faraday'schen Käfig nötig sein, bei dem ein Teil des Käfigs in den Deckel, der zur Schließung der Plasmakammer dient, integriert ist.

2. Das Zünden und Betreiben von dem kleinen Plasmen soll auch für Materialien wie z. B. Polymere, die gegenüber einer Plasmabehandlung empfindlich sind, funktionieren. Diese Proben sollen möglichst nur kurzzeitig einer hohen Leistungsdichte des Plasmas ausgesetzt sein.
3. Wegen des meist kleinen zur Verfügung stehenden Raums für die Integration von Plasmareaktoren in den vorhandenen Geräten ist eine räumliche Trennung von Generator, Anpassnetzwerk und dem Applikator nötig. Als Applikator wird hier im weiteren als derjenige Teil des Plasmasystems definiert, der in räumlicher Nähe mit der Plasmakammer steht, oder in diese voll oder teilweise integriert ist, wie z. B. eine Spule und/oder Kondensatoren bzw. weitere elektrische Bauteile. Bei Mikrowelleneinkopplung wären das spezielle Hohlleiter. Teile des Anpassnetzwerks können aber auch im Applikator integriert sein oder sich in der Nähe des Applikators befinden.
4. Der Betrieb soll für den Operator einfach sein. Vorzugsweise ist eine automatische Anpassung von Leistung und anderen Parametern an die jeweilige neu gewählte Umgebung d. h. an die vom Operator gewählte Probe, eine bestimmte zu untersuchende Stelle der Probe und damit einer bestimmten Position der Probe bzw. des Applikators oder Teile des Applikators bezüglich des Mikroskops erforderlich.
5. Die Zuleitung zum Applikator sollte beweglich gestaltet sein z. B. mit einem Koaxialkabel um eine räumliche Beweglichkeit des Plasmareaktors und damit eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Anwendungen zu erreichen.

6. Reinigungsentladungen zur Entfernung von Verunreinigungen des Plasmariums, wie sie in der Halbleiterindustrie eingesetzt werden, sollen automatisiert durchgeführt werden.
7. Auf zusätzliche Zündhilfsmittel wie UV-Strahlung oder radioaktive Strahlung (EP0665306B1) sollte möglichst verzichtet werden können, da sie insbesondere empfindliche Probenoberflächen beeinflussen können.

Lösung des technischen Problems, durch die Erfindung; Angaben zu technischen Merkmalen/Mitteln.

Oft wird für eine Probe eine Plasmabehandlung mehrmals hintereinander durchgeführt. Dabei ist es wichtig, dass der Plasmabehandlungsprozess reproduzierbar ist wie beispielsweise beim schrittweisen Entfernen von Schichten einer Probenoberfläche. Für die mit Plasma zu behandelnde Probe gibt es neben den Prozessparametern, wie der eingekoppelten Leistungsdichte und der Substrat- bzw. Proben-temperatur, zwei wichtige Ereignisse, die als minimale Voraussetzung gelten, damit eine Plasmabehandlung überhaupt stattfindet:

1. War die Zündung des Plasmas erfolgreich? (E_1)
2. Wurde das Plasma während der Betriebs- bzw. Behandlungszeit aufrecht erhalten? (E_2)

Es ist bekannt, dass Plasmen zum Zünden oft eine wesentlich höhere Leistung benötigen als zum Betrieb (Aufrechterhaltung des Plasmas) [1]. Nach dem Einschaltzeitpunkt der Leistung findet man bei Plasma-Reinigungsgeräten (Plasma-Cleaner) auch oft eine kleine Verzögerungszeit, bevor es zur eigentlichen Gasentladung kommt. Die Verzögerungszeit hängt u. a. davon ab, wie viele Ionen sich bereits beim Einschaltzeitpunkt in der Plasmakammer befinden (Ionen liegen z. B. aufgrund von kosmischer Strahlung vor). Kleine Plasmavolumina sind im Vergleich zu größeren Volumen schwieriger zu zünden, da bei einer Miniaturisierung das Verhältnis von der Oberfläche, die mit dem Plasma in Kontakt ist, zum Volumen groß wird [2]. Dies führt zu erhöhten Verlusten von Ladungsträgern an den Wänden. Für eine mit Plasma zu behandelnde Probe, insbesondere gegenüber einer Plasmabehandlung sensitiven Probe wie z. B. einem Polymerfilm ergeben sich z. B. bei einer gewünschten automatisierten, reproduzierbaren Plasmabehandlung mit dem Ziel z. B. einer Entfernung einer definierten Schichtdicke aus der Sicht des Plasmaprozesses folgende Fragen:

1. Wie lange war die Probe der Zündleistung ausgesetzt?
2. Wie lange war die Probe der Betriebsleistung ausgesetzt?
3. Wie ist allgemein die Qualität der Plasmabehandlung?

Wie wird das Problem gelöst?

Es gibt eine Vielzahl von erhältlichen RF-Komponenten zum Aufbau von Plasma-Systemen wie RF-Generatoren und Anpassnetzwerke (auch mit automatischer Anpassung). Die Bauteile sind jedoch meist nicht auf die speziellen Anforderungen von Mikroskopie ausgelegt, sondern orientieren sich an den Anforderungen der Halbleiterindustrie. Spezielle kleine Applikatoren zur induktiven oder zur kapazitiven Energieeinkopplung von Plasmareaktoren mit einem Volumen von 1 - 5 cm³ sind nicht erhältlich.

Im einfachsten Fall verwendet das beschriebene Verfahren folgende *Steuerung* für ein elektrisch angepasstes System. Für das Verfahren kann aber auch ein System mit automatischer Impedanzanpassung verwendet werden (Fig. 1).

Fig. 3 zeigt die Vorrichtung zum Zünden und Betreiben von kleinen flexiblen Plasmen bestehend aus einem RF-Generator 2 (vorzugsweise mit der Frequenz von 27.12 MHz) und einem speziellen Anpassnetzwerk 4 abgestimmt auf den RF-Applikator 14 und der beweglichen Plasmakammer 41. Der RF-Generator 2 und Teile des Anpassnetzwerks bilden den Sender 40, der über eine Zuleitung 42 (beweglich), vorzugsweise einem Koaxialkabel, mit dem Eingang des RF-Applikators 14 verbunden ist. Im einfachsten Fall wird der Sender 40 manuell mit Hilfe von Potentiometern (bevorzugt motorisiert) abgestimmt. Die Impedanzanpassung ist u. a. auch abhängig von der applizierten Leistung. Es zeigt sich jedoch, dass eine bestimmte maximale reflektierte Leistung, insbesondere beim Zündpuls, wegen der kleinen applizierten Leistungen akzeptiert werden kann. Die Reproduzierbarkeit des Prozesses steht bei mikroskopischen Anwendungen im Vordergrund. Ein geeigneter Filter 48, der vorzugsweise Licht im roten Bereich durchlässt, ist mit einem Lichtwellenleiter 20 (beweglich) mit dem Eingang eines Detektors 44 verbunden. Ein Controller 46 wertet das Ausgangssignal vom Detektor 44 aus und ist mit einem Host-Rechner 16 verbunden. Im einfachsten Fall wird die Ausgangsleistung am Sender 40 über einen vorzugsweise analogen Eingang (0 - 10V) mit Hilfe einer externen analogen Spannung, mit einem Steuerprogramm vom Host-Rechner 16 aus, kontrolliert. Die dazu erforderlichen analogen Spannungen werden mit Hilfe eines Steuerprogramms auf dem Host-Rechner, im einfachsten Fall, mit Hilfe einer Datenaquisitionseinsteckkarte erzeugt (nicht gezeichnet). Fig. 4 zeigt schematisch ein Leistungs-Zeit-Diagramm (Leistung am Ausgang des Senders 40). Zur Übersichtlichkeit zeigt Fig. 4, Fig. 5, Fig 5b und Fig. 6 idealisierte Leistungs-Zeit-Diagramme. Die Diagramme sind nicht maßstäblich. Verzögerungszeiten aufgrund von Übertragungsgliedern höherer

Ordnung bleiben hier unberücksichtigt, da dies für das jeweilige System konstante Größen sind. Zum Zünden des Plasmas wird im einfachsten Fall ein kurzer Leistungspuls mit einer festen Pulsbreite 54 verwendet (Fig. 4). Alternativ wäre aber auch eine Leistungsrampe möglich (Fig. 5b). Beim Leistungssprung von der Zündleistung 50 auf die Betriebsleistung 56 muss das Plasma aufrecht erhalten werden und darf nicht erlöschen. Abhängig von Parametern, wie Gasfluss und Druck oder Gasart sowie Art und Größe der Probe und weiteren Parametern, die die Zündung des Plasmas und seine Aufrechterhaltung beeinflussen, sind die Parameter Zündleistung 50 bzw. Betriebsleistung 56 und der festen Plusbreite 54 von typisch 10 – 20 Millisekunden zu wählen. Die Behandlungszeit d. h. die Zeit, in der die Probe einem Plasma ausgesetzt ist, ergibt sich aus der Pulsbreite 54 minus der statistisch auftretenden kleinen variable Verzögerungszeit 52 plus der Behandlungszeit bei der Betriebsleistung 58. Die Verzögerungszeit 52 hängt u. a. davon ab wie viele Ionen sich bereits vor der eigentlichen Zündung des Plasma in der Plasmakammer befunden haben. Im Hinblick einer reproduzierbaren Plasmabehandlung ist es nicht akzeptabel dass die Behandlungszeit wegen der Verzögerungszeit 52 variabel ist. Dies gilt insbesondere falls die Verzögerungszeit 52 wegen bestimmter Prozessparameter wie Druck und Gasfluss groß wird (bis zu mehreren Sekunden). Insbesondere ist für Proben, die gegenüber einer Plasmabehandlung empfindlich sind, die Plusbreite 54 und die Zündleistung 50 und die Betriebsleistung 56 zu minimieren. Mit einer Kalibrierprobe, die die selben Eigenschaften aufweist wie die zu vermessende Probe, kann ein Operator die gewünschten Parameter (50, 56, 54 und 58) experimentell bestimmen. Für ein Plasma, das dem Operator optisch zugänglich ist, ist dies mit einem geeigneten Steuerprogramm zu bewerkstelligen, da das Zünden eines Plasmas, insbesondere eines Niederdruckplasmas, mit einer typischen Aussendung von Strahlung mit sichtbaren Anteilen verbunden ist. Somit lassen sich geeignete Parameter experimentell bestimmen. Befindet sich der Reaktor jedoch in einem Mikroskop und ist die Plasmakammer gekapselt durch eine geeignete Abschirmung 49 (Fig. 3), gilt dies nicht mehr und die einfache Steuerung wird nun durch ein rückgekoppeltes System ersetzt. Für eine erfolgreiche Plasmabehandlung müssen mindestens jeweils die Zündung (E_1) und die Aufrechterhaltung des Plasmas (E_2) stattgefunden haben. Leider ist insbesondere bei der Nutzung von kleinen Plasmen die Erfassung der Ereignisse E_1 und E_2 mit Hilfe der Änderung der reflektierten Leistung und/oder der eingekoppelten Leistung (beim Zünden des Plasmas), wegen der kleinen Leistungsaufnahme des brennenden Plasmas selbst (typisch 0.5 - 3 W) schwierig und fehleranfällig. Die Zündung des Plasmas ist auch mit elektronischen Bauteilen wie beispielsweise Spulen, Hall-Sensoren und Feldplatten schwierig und fehleranfällig. Eine sehr sichere Möglichkeit zur Erkennung des Zündzeitpunktes ist jedoch die Änderung des Lichts in der Plasmakammer, da es unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen ist.

Der Detektor sollte folgende Anforderung erfüllen:

1. Er sollte Lichtänderungen sicher erkennen.
2. Das Ausgangssignal des Detektors sollte möglichst unempfindlich gegenüber einer Beeinflussung von Fremd- oder Umgebungslicht sein.

Das Verfahren nutzt deshalb ein optisches System um mindestens die Ereignisse E_1 und E_2 festzustellen. Es besteht im einfachsten Fall aus einem beweglichen optischen Lichtwellenleiter 20 einem Filter 48 und einem für das vom Plasma emittierte Licht der Plasmakammer empfindlichen Detektor 44. Der Filter 48 wird vorzugsweise in der Nähe der Plasmakammer 41, die vorzugsweise aus Glaskeramik oder Glas besteht befestigt (vorzugsweise berührungslos). Der Filter 48 eignet sich besonders für Luft- und Sauerstoffplasmen. Ein spezielles Fenster in der Plasmakammer ist nicht nötig, falls die Plasmakammer aus Glas oder vorzugsweise aus Glaskeramik mit einer Wandstärke von typischerweise 2 mm besteht. Der Lichtpuls, der fast zeitgleich oder nach einer sehr kurzen Verzögerungszeit, mit dem Zünden des Plasmas entsteht, wird dem Filter 48 und dem Lichtwellenleiter 20 zum Eingang des Detektors 44 zugeführt. Im einfachsten Fall besteht er, wie Fig. 7 zeigt, aus einer geeigneten Photodiode 62 mit Verstärker einem Sperrfilter 64, einem Steiggeschwindigkeitskomperator 66 und einem Signalumformer für TTL- Signale 68. Der Ausgang des Detektors 44 liefert dem Controller 46 einen Tiggerimpuls. Als Controller kann eine geeignete Daten-aquisitionseinsteckkarte verwendet werden. Erhältliche Datenquisitionseinsteckkarten können so programmiert werden, dass sie auf externe Tiggerimpulse mit hoher Geschwindigkeit Aktionen auslösen können. Es wird möglichst sofort, oder nach einer optional festen Verzögerungszeit 60, nach der erfolgten Zündung (Fig. 6) auf die Betriebsleistung 56 umgeschaltet und zwar dann, wenn das Plasma wirklich gezündet hat. Fig. 5 zeigt ein im Vergleich zu Fig. 5 verbessertes Leistungs-Zeit-Diagramm. Sofort nach erfolgter Zündung wird von der Zündleistung 50 auf die Betriebsleistung 56 umgeschaltet. Die Behandlungszeit ergibt sich einfach aus der Behandlungszeit bei der Betriebsleistung 58. Die Umschaltung auf die Betriebsleistung 56 wird im Gegensatz zu dem nicht rückgekoppelten System in Fig. 4 durch den Lichtpuls der Zündung selbst initiiert. Fig 6 zeigt ein Leistungs-Zeit-Diagramm mit einer zusätzlichen festen Verzögerungszeit 60 nach erfolgter Zündung. Auch hier spielt die statistisch auftretende kleine variable Verzögerungszeit 52 für die plasmabehandelte Probe keine Rolle, und der Zündprozess ist nun zeitlich klar definiert. Die Behandlungszeit d. h. die Zeit, in der die Probe dem Plasma ausgesetzt war, ergibt sich aus der festen Verzögerungszeit 60 nach erfolgter Zündung und der Behandlungszeit 58 bei der Betriebsleistung. Fig. 5b zeigt beispielhaft eine weitere Möglichkeit zu zünden. Statt einem Leistungspuls wird eine Leistungsrampe benutzt (nicht bevorzugt). Es könnten aber auch gepulste Plasmen (leistungsmodulierte Plasmen) benutzt werden, indem auf den analogen Eingang des Senders 40 die entsprechenden Signale geschaltet werden. Die Leistung in Fig. 4, Fig. 5, Fig. 5b und Fig. 6 wäre durch die Pulsamplitude zu ersetzen. Der Zündvorgang und damit die Leistungs-Zeit-Diagramme würden sich aber nicht prinzipiell ändern. Weitere

Parameter wären dann das Tastverhältnis und die Pulsdauer.

Optional verfügt der Detektor 44 über einen zusätzlichen vorzugsweise analogen Ausgang, der das Ereignis E_2 (Plasma brennt) durch eine Spannung anzeigt (nicht gezeichnet). Ab einer einstellbaren, minimalen Lichtintensität (Schwelle) wird die Spannung von 5V auf diesen Ausgang geschaltet. Optional kann dieser Ausgang in kurzen Zeitabständen während der Behandlungszeit 58 bei der Betriebsleistung vom Steuerprogramm geprüft werden und dient als Fehlersignalquelle falls das Plasma während der Behandlungszeit 58 erlischt. Die Schwellenwerte für die Lichtintensität, bei denen das Ereignis E_1 bzw. E_2 stattfinden sind manuell oder vorzugsweise durch analoge Eingänge S_1 bzw. S_2 (nicht gezeichnet) am Detektor 44 einstellbar. Der Vorgang kann automatisiert werden. Falls möglich, wird zur Bestimmung optimaler Parameter eine Kalibrierprobe, die der zu untersuchenden Probe in den elektromagnetischen Eigenschaften möglichst gleicht, in das System eingebracht. Eine implementierte Trainingsfunktion in der Steuersoftware, verändert ausgehend von Startparametern die Parameter solange, bis die Ereignisse E_1 und E_2 sicher stattgefunden haben. Diese Funktionalität kann auch weitere komplexe Aktionen beinhalten, die das Zünden oder das Betreiben des Plasmas beeinflussen könnten, oder für spezielle mikroskopische Aufgaben notwendig sind wie beispielsweise:

1. Ein motorisiertes Bewegen des Reaktors in x-, y- Richtung zum Ort der Plasma-behandlung (optional). Dies ist nur dann nötig falls eine in-situ Plasmabehandlung ($\Delta x = \Delta y = 0$) nicht möglich ist, z. B. weil der Kopf 47 gegenüber elektromagnetischer Strahlung extrem empfindlich sein kann.
2. ein optionales Finetuning (falls das System damit ausgerüstet ist),
3. das automatische Schließen und Öffnen des Plasmavolumens,
4. optionale Reinigung der Plasmakammer bei hoher Leistung,
5. die Kontrolle des Prozessdrucks, des Gasflusses und der Gasarten (Gasmischungen),
6. die Reaktion des Systems auf Fehler mit Hilfe der Ereignisse E_1 und E_2 ,
7. das automatische Bewegen des Reaktors zum Ort der mikroskopischen Untersuchung mit der mikroskopischen Untersuchung und
8. das optionale n-malige Wiederholen der Schritte erstens bis siebtens.

Als Ergebnis einer solchen Trainingsfunktion erhält man eine definierte Behandlung einer Probe wie sie z. B. für das schichtweise Abtragen einer Probenoberfläche notwendig ist für die jeweiligen gültigen „Verhältnisse“ (räumlich und elektrisch). Die Bedingungen sind nun reproduzierbar und wir haben nun definierte Zünd- und Betriebsbedingungen. Der Detektor 44 kann im RF-Generator 2 oder im Anpassnetzwerk 4 oder im Sender 40 integriert sein. Falls eine komplexere Auswertung der Plasma-Emission erforderlich ist wie bei der Endpunktdetektion, kann dies durch den

Einsatz der aufwendigeren optischen Emissionspektroskopie erreicht werden z. B. mit Hilfe erhältlicher Plasmamonitore wenn eine weitere Auswertung des Spektrums wünschenswert ist. Für mikroskopische Anwendungen ist die reproduzierbare Plasmabehandlung bei kleinen Leistungen im Vordergrund. Auf eine Feinabstimmung der Impedanzanpassung (Fig. 1) kann vorzugsweise verzichtet werden, falls für bestimmte Parameter, wie der ins System eingekoppelten Leistung, bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden.

Vorteile der Erfindung

Das Verfahren liefert eine neue Möglichkeit kleine bewegliche Plasmen definiert und reproduzierbar in variabler Umgebung zu zünden und zu betreiben. Das Verfahren löst Probleme die beim Betrieb von kleinen beweglichen Plasmen vorhanden sind, weil sie besonders empfindlich gegenüber unvermeidbaren Störeinflüssen reagieren (erlöschen oder nicht zünden) wie:

- unterschiedliche Größe von Proben (Load),
- unterschiedliche Leitfähigkeit von Proben und/oder deren Trägermaterialien,
- unbeabsichtigte (aber oft unvermeidbare) Einkopplung von Anteilen der Leistung des Applikators oder des Plasmas selbst in Objekte, die sich in der Nähe des Plasmas oder des Applikators befinden (z. B. Objektive von Mikroskopen, Sonden und Sondenhalter von Rastersondenmikroskopen insbesondere Atomkraftmikroskop-Köpfen) und
- die schwierig beherrschbare variable elektromagnetische Umgebung für das kleine bewegliche Plasma.

Mit der optischen Erfassung der Zündung und des Betriebes des Plasmas ist es möglich optimale Parameter automatisiert zu finden und eine für mikroskopische Anwendungen erforderliche reproduzierbare Plasmabehandlung durchzuführen. Der Detektor (Fig. 7) sorgt für eine für viele Plasmaprozesse reproduzierbare Plasmabehandlung. Das Verfahren könnte aber auch mit einem aufwendigeren Plasmamonitor-System realisiert werden. Dies ist aber nur notwendig, wenn weitere Prozessparameter erfasst und ausgewertet werden sollen, z. B. zum Finden vom Endpunkt einer Behandlung. Dazu wird für ein bestimmtes zu ätzendes Material ein entsprechendes charakteristisches Spektrum ausgewertet. Die vorliegende Erfindung liefert einen kompletten Nachrüstungssatz z. B. für ein Atomkraftmikroskop (add on kit) bestehend aus:

1. Einem „Probenhalter mit integriertem Plasma“ in den Ausführungsformen: ICP (inductive coupled plasma), RIE (reactive ion etching) oder Hybridformen aus induktiver und kapazitiver Energieeinkopplung und Mikrowelleneinkopplung,

2. einem geeigneten Sender (Fig. 3),
3. einem induktiven RF-Applikator,
4. einem geeigneten Detektor System (Fig. 7)
5. einem optionalen kapazitiven RF-Applikator und einem
6. geeignetem Vakuumsystem (Fig. 2).

Die Erfindung erweitert die Flexibilität eines existierenden Mikroskops bezüglich der vielfältigen neuen Möglichkeiten bei Anwendungen und Experimenten.

Literatur

- [1] Friedrich Kohlrausch: Praktische Physik, 23.Auflage, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1985.
- [2] Y. Yin, J. Messier and J. Hopwood: Miniaturization of Inductively Coupled Plasma Sources, IEEE Transactions on Plasma Science, 27(5), 1516-1524, (1999).
- [3] StellarNet (www.stellarnet-inc.com)
- [4] MKS (www.mksinst.com und www.mksinst.com/enihome.html)
- [5] Harrick (www.harricksci.com)
- [6] Hamamatsu (www.hamamatsu.de/mpm/mpm.htm), Plasmamonitor
- [7] March (www.marchplasma.com)
- [8] Tegal (www.tegal.com)
- [9] Triontech (www.triontech.com)
- [10] Fischione (www.fischione.com)
- [11] Appliedmaterials (www.appliedmaterials.com)
- [12] Oxford (www.oxfordplasma.de)
- [13] Orbis (www.orbitech.co.uk)
- [14] Semicore (www.semicore.com)
- [15] Plassys (www.plassys.com/plassyse/index.htm)
- [16] SPI (<http://www.2spi.com/catalog/instruments/etchers.html>)

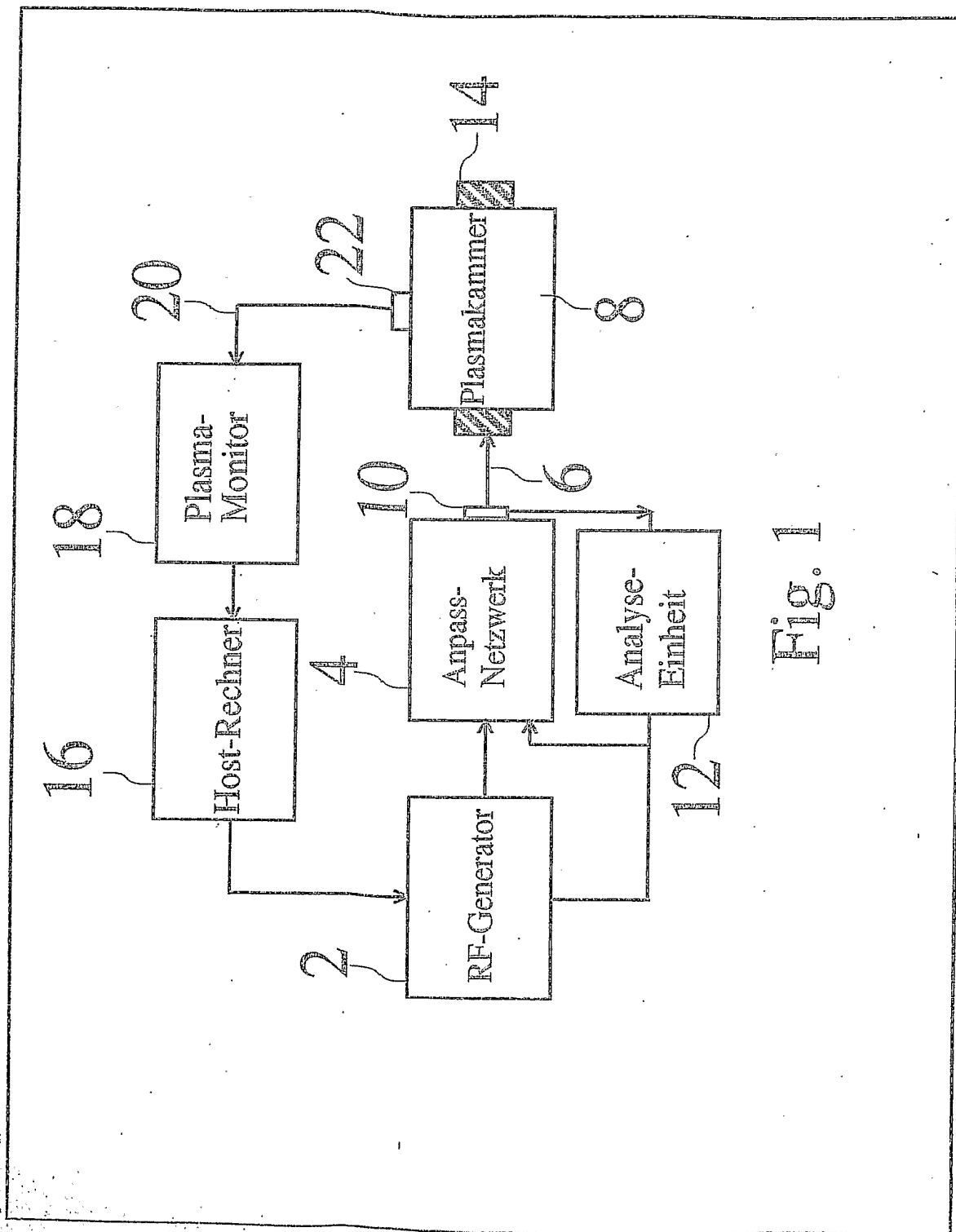
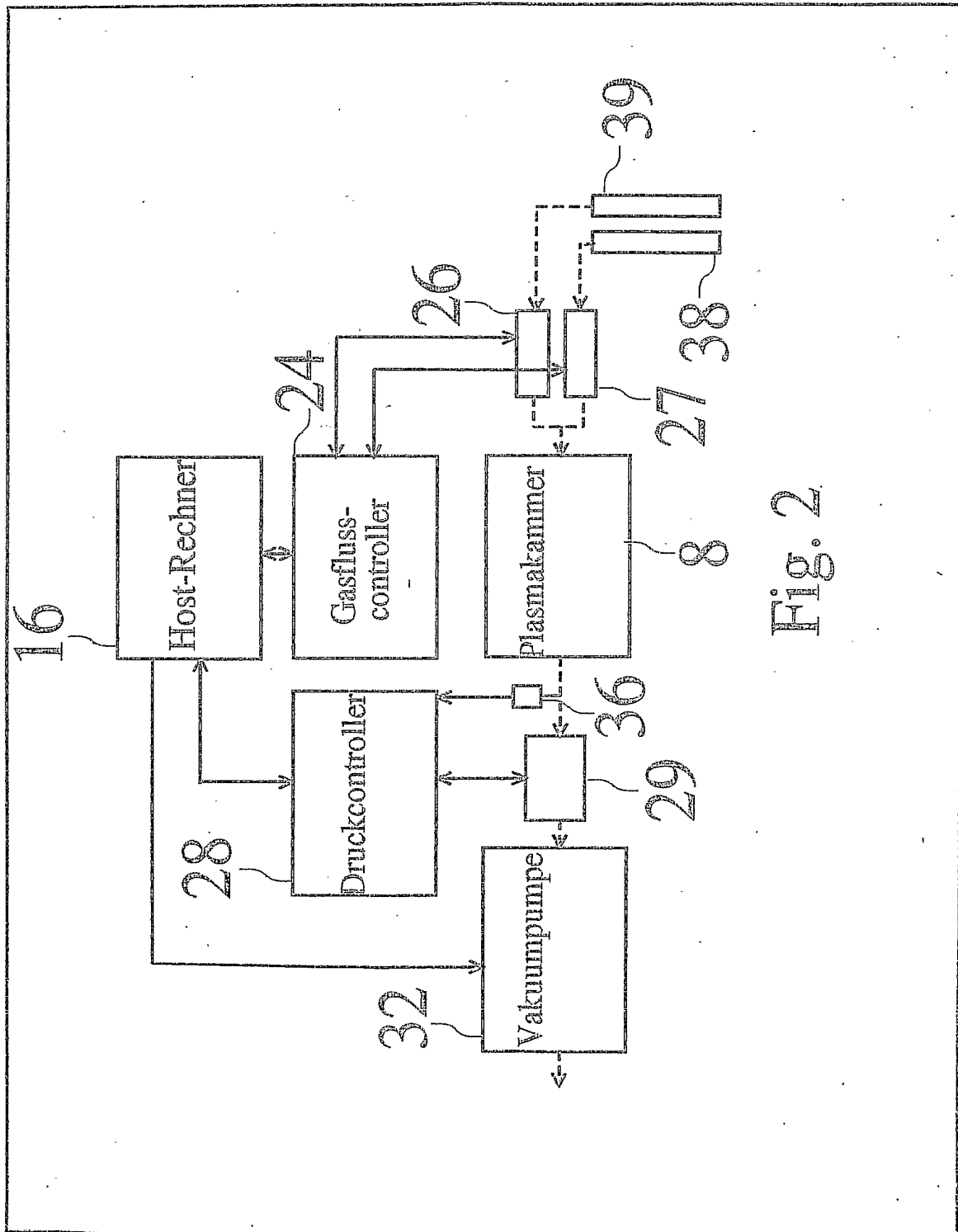


Fig. 1



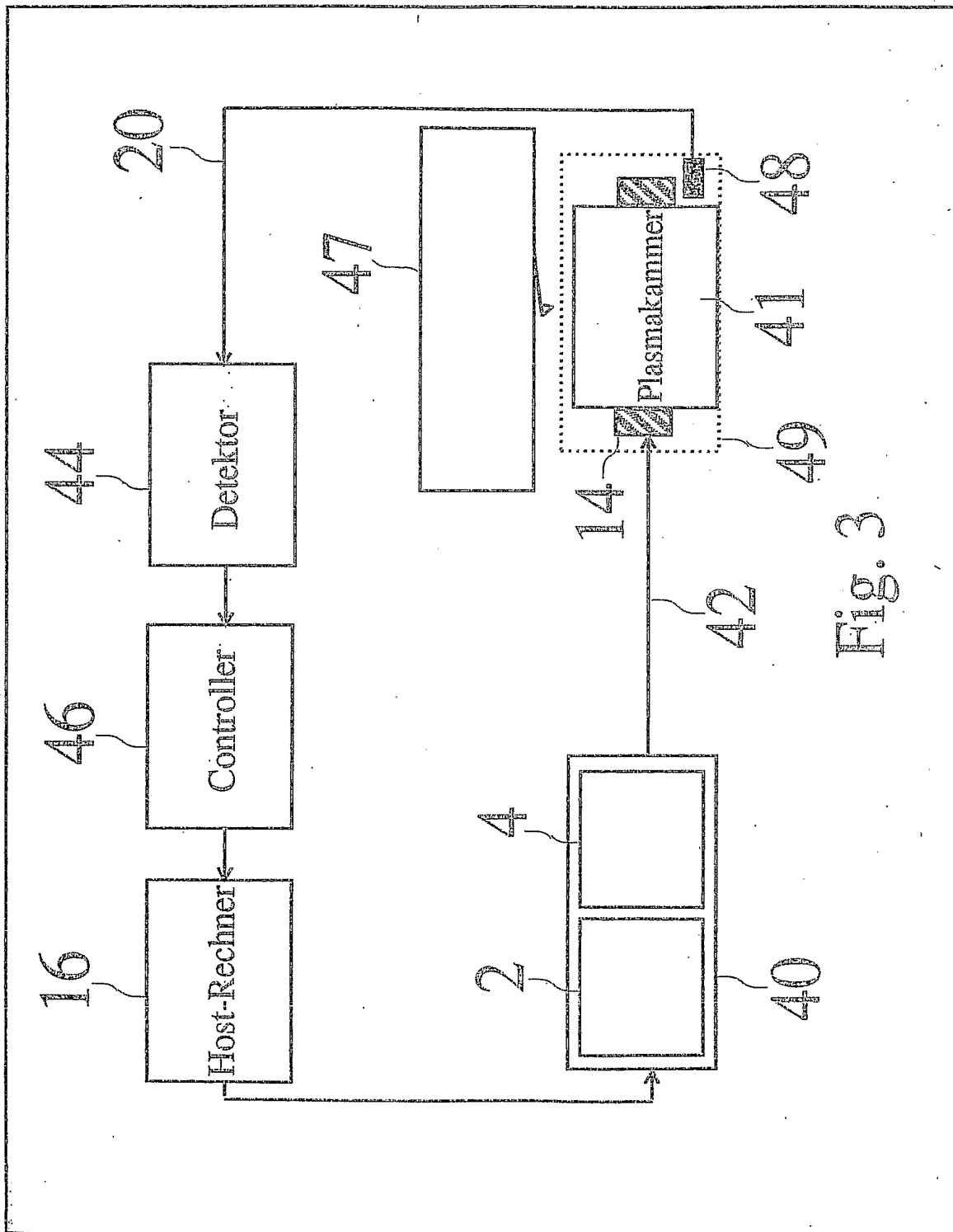
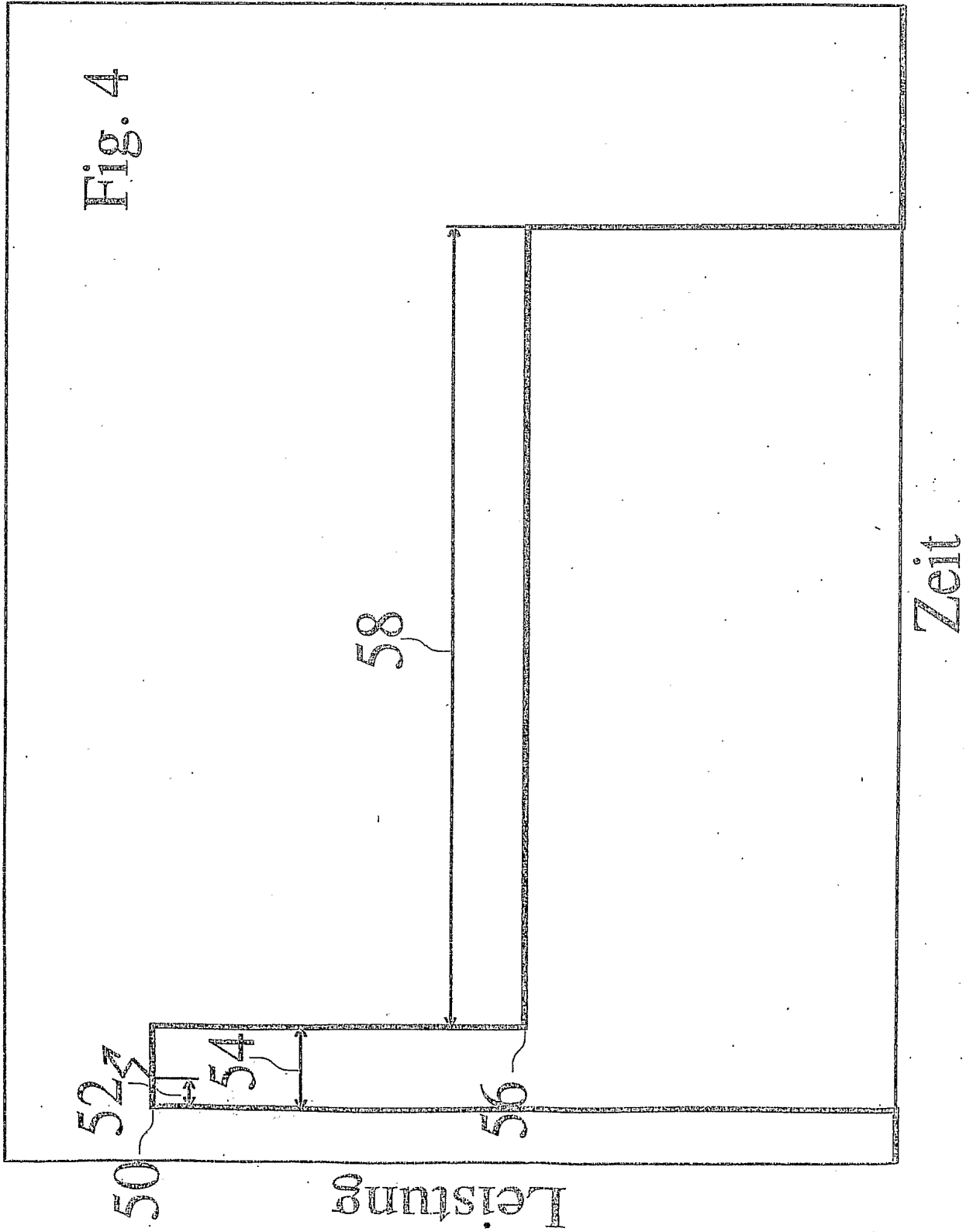
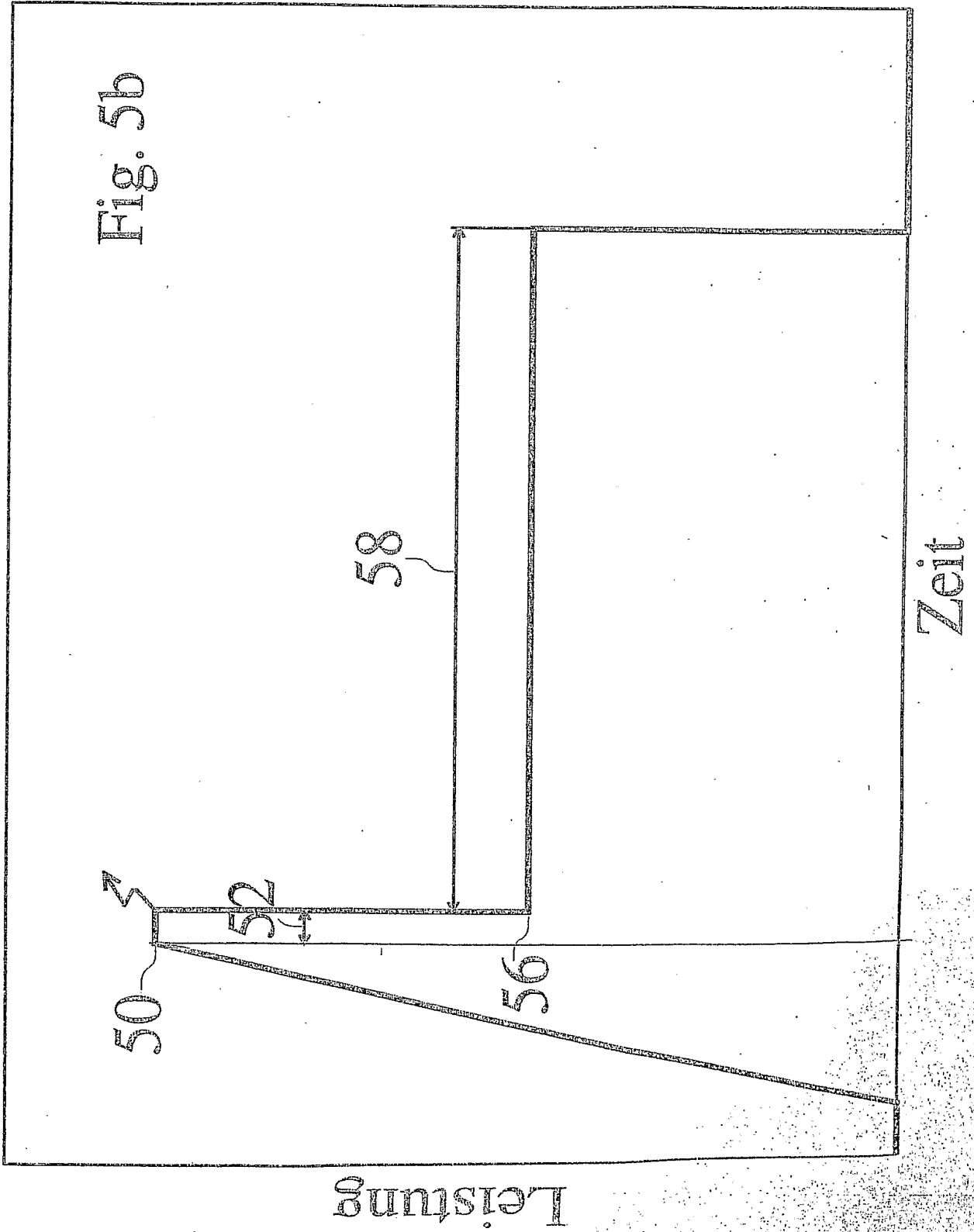


Fig. 3





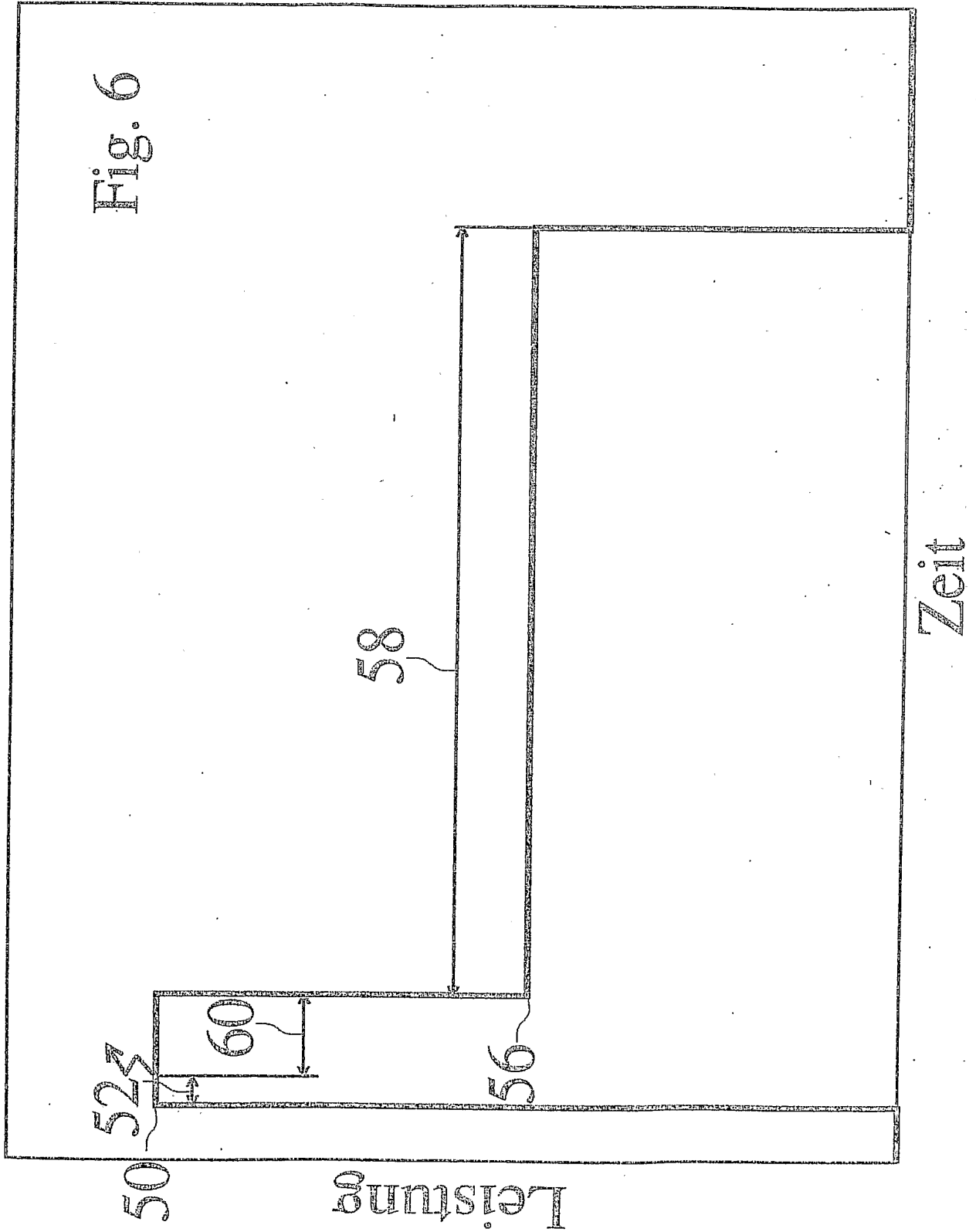
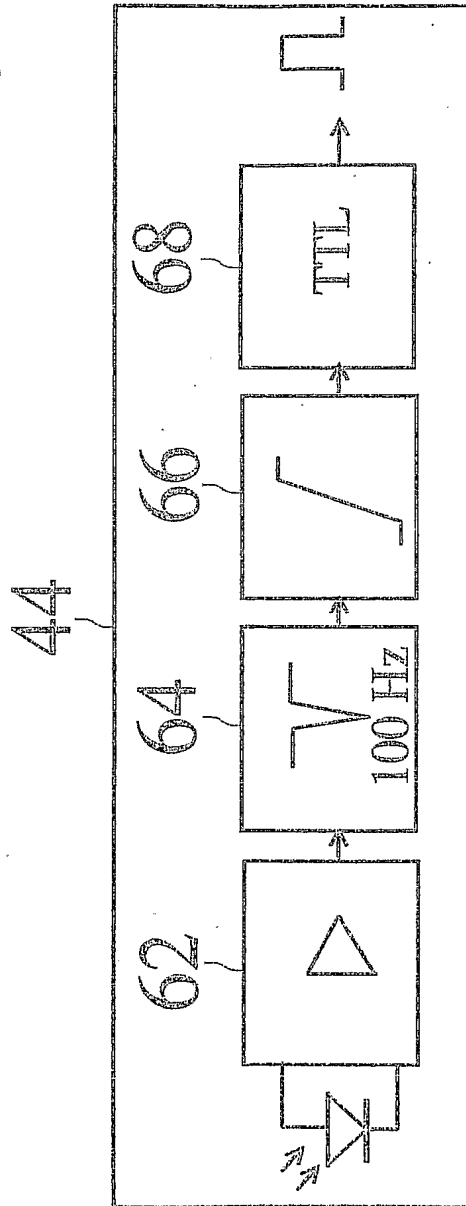
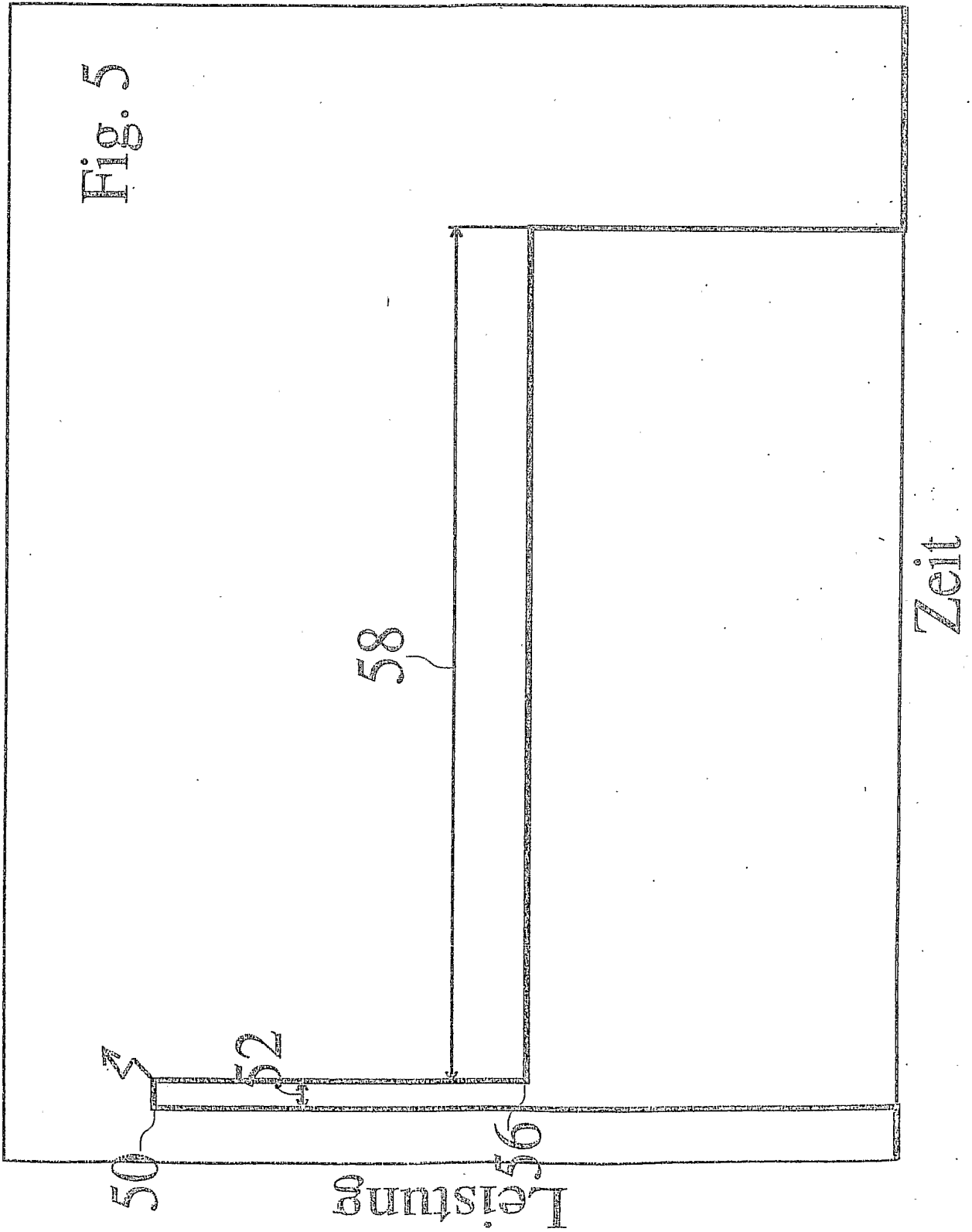


Fig. 7





Teil II:

Probenhalter mit integriertem Plasma

Derzeitiger Stand der Technik und damit verbundene Nachteile

Derzeitig erhältliche Plasma-Geräte sind nicht auf die speziellen Anforderungen von Mikroskopie ausgelegt sondern orientieren sich an den Anforderungen der Halbleiterindustrie [3-15]. Es handelt sich meist um Großgeräte. Kleine Geräte mit einem Plasmavolumen von 1-5 cm³ sind nicht im Handel erhältlich oder erfüllen nicht die Erfordernisse für Mikroskopie insbesondere Rastersondenmikroskopie.

In der Rastersondenmikroskopie wird eine Probenoberfläche abgerastert z. B. eine kleine Fläche von 3 x 3 Mikrometer²) und Eigenschaften der Fläche aufgezeichnet. So wird z. B. bei Atomkraftmikroskopie unter anderem die Morphologie (Höhenunterschiede einer Probenoberfläche) aufgezeichnet. Für viele Anwendungen und wissenschaftliche Fragestellungen ist von Interesse wie sich genau diese gemessene Fläche einer Probe nach einer Behandlung mit Plasma verhält.

Mit einer Plasmabehandlung kann z. B. eine dünne Schicht entfernt werden oder die Oberfläche aktiviert werden oder es können andere Effekte induziert werden.

Wo liegt das Problem?

Einfache Verfahren zur Repositionierung sind bekannt [16]. Nimmt man eine Probe aus dem Mikroskop, gibt sie in ein erhältliches Plasma-Gerät (z. B. Plasmacleaner), behandelt sie und richtet sie so exakt wie möglich (z. B. indem man eine Art Lehre z. B. einen Anschlag benutzt), genau so aus wie sie vor der Behandlung im Mikroskop ausgerichtet war, existiert folgendes Problem:

Das einfache Annähern der Sonde (engage) d. h. die z-Verschiebeeinheit des Mikroskops bewegt die Sonde in der z-Richtung in die Nähe der Oberfläche und das anschließende Rastern der Oberfläche liefert nicht genau die selbe Stelle der Oberfläche (Spot).

Das Wiederauffinden (Respositionieren) auf genau die zuvor untersuchte Stelle ist zeitaufwendig und nur von geschultem Fachpersonal zu bewerkstelligen.

Lösung des technischen Problems, durch die Erfindung; Angaben zu technischen Merkmalen/Mitteln.

Gerne würde man eine Probe an dem Ort an dem sie auch mikroskopiert wurde plasmabehandeln (in situ) und dann wieder abrastern und sie wieder plasmabehandeln

usw. Leider erfordern viele Anwendungen ein sog. Niederdruckplasma, so dass folgendes gefordert wird:

- a) Die Probenoberfläche muss mit einer Sonde (z. B. AFM-Spitze) abgescannt werden
- b) Die Probe muss danach einem Niederdruckplasma ausgesetzt werden grosse Bewegungen der Sonde senkrecht zur Probenoberfläche (z-Richtung) sind nicht erwünscht, da dann die selbe Stelle nicht mehr genau wiedergefunden werden kann (siehe Fig. 4).
- c) Die Spitze soll sich also nur so wenig wie möglich in z-Richtung bewegen bevor die Probe plasmabehandelt wird.
- d) Erhältliche und vorhandene Mikroskope sollen mit dem „Probenhalter mit integriertem Plasma“ ohne wesentliche bauliche Änderungen nachgerüstet werden können (wichtig für die Marktfähigkeit der Erfindung).

Wie wird das Problem gelöst?

Bezüglich der Handhabung der Proben weisen erhältliche Mikroskope im besonderen Rastersondenmikroskope Unterschiede auf. Meist ruht die Probe während der Abrasterung in der x- und y-Richtung. Es gibt aber auch Mikroskope bei denen die Probe auf einen Scanner aufgebracht wird und die Sonde in der x- und y-Richtung ruht. Insbesondere gibt es Mikroskope bei denen hochgenaue (im sub- Mikrometerbereich) arbeitende Probentische die Raster-Bewegung in x- und y-Richtung ausführen. Zum Teil besitzen diese Tische (z. B. wegen zusätzlicher möglicher optischer Mikroskopie) ein Loch. Auf dieses wird typischerweise ein Objektträger gelegt, auf dem sich die zu untersuchende Probe befindet. Für die in Fig 1 beschriebene Reaktorgeometrie ist es völlig unerheblich ob sich die Sonde über dem Reaktor bewegt oder sich der ganze Reaktor (mit der Probe) bewegt. Die Reaktorgeometrie könnte eventuell auch in erhältlichen hochgenau arbeitenden (im sub- Mikrometerbereich) Probentischen eingesetzt werden.

Meist besitzen aber erhältliche Mikroskope im besonderen Rastersondenmikroskope Probentische (meist aus Edelstahl), die frei in x-Richtung und y-Richtung beweglich sind und zum Teil motorisiert sind (Chuck). Der Operator kann sich damit leicht eine Stelle auf der Probenoberfläche aussuchen. Sie weisen eine Dicke von typisch 2-3 cm auf. Auf sie wird die Probe gelegt (zwischen der Grundplatte G eines Mikroskops (meist Granit) und der Sonde S gibt es oft nur wenig Platz, typischerweise sind das 2 - 3 cm Zentimeter (Fig. 1). Die Sonde kann meist mit hochwertigen, in den Mikroskopen integrierten, Verschiebeeinrichtungen, senkrecht zur Oberfläche der Probe (z-Richtung) bewegt werden. Es ist bekannt, dass bei nur kleiner Bewegung in z-Richtung die zuvor untersuchte Stelle auf der Probenoberfläche einfach wiedergefunden werden kann (typischerweise wird die Spitze bei einem Wegziehen (de-engage) mechanisch einige Millimeter nach oben bewegt (typischerweise 1 mm) (Fig. 4).

Die Erfindung zeigt eine neue Probenhaltergeometrie die die Forderungen aus

a), b), c) und d) erfüllt (Fig. 1).

Ein nach oben offener Plasmabehälter vorzugsweise aufgebaut aus einem Zylinder 1 (der Durchmesser beträgt typischerweise etwa 20 mm und die Höhe beträgt typischerweise ca. 12 mm) aus Glas oder vorzugsweise aus erhältlichem mechanisch bearbeitbarer erhältlichem Glaskeramik (typische Dielektrizitätskonstante: 6.03 bei 1 MHz, 25 Grad), trägt auf einem Abstandshalter 2 (z. B. ein Glasrohr mit dem Durchmesser 6 mm, bevorzugt ist er integriert in den Zylinder 1 oder einsteckbar in den Zylinder 1 und besteht aus Glaskeramik, die Probe 3 (z. B. ein Polymerfilm auf einem Siliziumträger mit einer typischen Dicke von 0.5 mm).

Die Probe kann im einfachsten Fall mit erhältlichem, geeignetem und doppelseitig klebendem Befestigungsmaterial auf dem Abstandshalter, der die gewünschte Höhe, abhängig von der Probendicke, aufweist befestigt werden. Der Abstandshalter 2 kann im einfachsten Fall auf den Zylinder 1, wie die Probe, aufgeklebt werden. Der Abstandshalter 2 kann durch eine alternative Geometrie entfallen bzw. ersetzt werden.

Fig. 3 zeigt eine Ausführungsform einer Probenhalterung. Die Probe wird auf einer kleinen Platte (bestehend vorzugsweise aus Glaskeramik) vorzugsweise mit klebendem Befestigungsmaterial (Leittab) befestigt. Die kleine Platte verfügt über Halterungsstege (Fig. 3, unten Draufsicht). Durch geeignete Aussparungen im Zylinder 1 für die Halterungsstege kann die Probe variabel in geeignete Messposition gebracht werden (Variation der Höhe je nach der Dicke der Probe). Der Abstandshalter 2 kann mit einer Vorrichtung zur Probenheizung und/oder Probenkühlung nach dem Stand der Technik ausgerüstet sein (nicht gezeichnet). Solche Einrichtungen verfügen über die Möglichkeit der in-situ Temperaturmessung der Probe mit geeigneten Sensoren. Im einfachsten Fall kühlt und/oder heizt ein erhältliches miniaturisiertes Peltier-Element (z. B. mit den Abmessungen 4 mm x 4 mm x 2.6 mm) die Probe 3. Dazu kann ein geeignetes Peltier-Element in den Abstandshalter 2 integriert sein oder wird einfach auf den Abstandshalter 2 aufgeklebt (nicht gezeichnet). Der Abstandshalter 2 kann mit einer Einrichtung zur Wärmeabfuhr ausgestattet sein (nicht gezeichnet). Dazu dient im einfachsten Fall eine Leitung, die bevorzugt aus Kupfer besteht. Sie ist vorzugsweise in den Abstandshalter 2 integriert. Die Leitung wird nach Außen geführt und ist vorzugsweise mit einem geeigneten Kühlkörper, der sich auf dem Halter 9 befinden könnte verbunden (nicht gezeichnet). Zur Heizung könnte optional eine Heizfolie oder miniaturisierte Heizelemente (Heizpatronen) nach dem Stand der Technik eingesetzt werden. Die Wärmeabfuhr könnte auch mit Heatpipes bewerkstelligt werden. Auf dem Halter 9 könnte auch ein Lüfter integriert sein.

Die Größe des Volumens ist typischerweise 2.5 cm³ richtet sich aber nach der Größe der zu untersuchenden Probe (typischerweise 5 x 5 mm²) und nach der Form und Größe des verwendeten Sondenhalters vom verwendeten Mikroskop.

Der Abstandshalter sorgt zusätzlich für eine geeignete Verwirbelung des Gases oder der Gasmischungen. Das Volumen besitzt einen speziell geformten Einlass (Zer-

stäuber) 4 für ein Gas oder Gasmischungen, der vorzugsweise durch eine Bohrung mit möglichst kleinem Durchmesser realisiert wird. An den Auslass 5 wird Vakuum angelegt. Der Durchmesser des Auslasses muss entsprechend der Saugleistung der Pumpe gewählt werden um keine zu großen Gasflüsse zu induzieren. Dies tritt insbesondere bei einfachen Einlassregelungen auf, bei denen Gasfluß und Druck nicht unabhängig voneinander einstellbar sind. Eine einfache Regulierung des Druckes p in dem Volumen V ist eine sog. Einlassregulierung mit einem Ventil V , das vor den Einlass geschaltet wird (nicht gezeigt). Stand der Technik sind aber vorgeschaltete Gasmischsysteme mit Massenflussregeler(n). Der Druck wird üblicherweise über die Saugleistung der Pumpe mit speziellen Ventilen, möglichst unabhängig vom Fluss, eingestellt. Eine spezielle flache Spule 6, vorzugsweise eine Spiralspule, sorgt für die induktive Energieeinkoppelung (inductive coupled plasma, ICP). Das Volumen kann nun beliebig oft mit der dünnen Platte 7 der Dicke d , vorzugsweise aus Glas oder Glaskeramik abgeschlossen werden, während der Probenhalter am seinem Ort verbleibt (in situ).

Eine andere technische Ausgestaltung ist, statt der dünnen Platte einen abgeschrägten Verschlussdeckel zu verwenden, der auf den abgeschrägten Zylinder geschoben wird. (die Mechanik zur Drehbewegung ist auf dem Halter 9 vorzugsweise integriert). Diese Geometrie sorgt insbesondere dafür, dass eine Elektrode 14, die im abgeschrägten Verschlussdeckel integriert sein kann, sich nach dem Schliessen des Verschlussdeckels immer an der gleichen Position über der Gegenelektrode ist (nicht gezeigt). Die Sonde sollte nur wenig in z -Richtung bewegt werden, damit die Positionierungsfehler bei der Wiederfindung der zuvor untersuchten Stelle so klein wie möglich bleibt (es handelt sich hierbei um die mechanische Ungenauigkeit der z -Verschiebeeinheit der Mikroskope).

Die minimal nötige Bewegung der Sonde um die Probe einem Plasma auszusetzen, ergibt sich aus der Probenhaltergeometrie und aus der Dicke d der Abdeckplatte 7, typischerweise je nach Material und verwendetem Druckbereich (0.1 - 3 mbar) von 1 - 2 mm plus der Höhe x , die die Probenoberfläche unterhalb der Oberkante der Dichtung 8 positioniert ist, plus einem je nach Art der Abschirmung (die vorzugsweise oberhalb der Spule 6 angebracht wird) gewähltem Sicherheitsabstand s . Der Durchmesser D oder eine anders geformte Öffnung (diese richtet sich nach der Geometrie des verwendeten Spitzenhalters des Mikroskops) ist typischerweise 20 mm. Das Volumen könnte auch durch ein kugelförmiges Objekt, das oben eine Öffnung aufweist, realisiert werden. Die Probenoberfläche wird trotz dem stark reduzierten Plasmaplasma direkt über der Probenoberfläche geätzt, weil die Lebensdauer von Radikalen (wichtig beim chemischen Ätzen) im Sekundenbereich liegt. Die Konzentration von Radikalen ist im Plasma und sogar in einer mit einem Faradayschen Käfig abgeschirmten Probe identisch (Michael Köhler: Ätzverfahren für die Mikrotechnik, S. 145).

Die neuartige Geometrie ist aber auch gut für kapazitive Energieeinkoppelung ge-

eignet, wie z. B. für das Reactive-Ion-Etching-Verfahren (RIE), das vor allem in der Halbleiterindustrie verwendet wird, da zusätzlich zum chemischen Ätzen noch ein Beschuß der Probe mit Ionen gewünscht ist um eine hohe Anisotropie zu erreichen.

Fig. 3 zeigt verschiedene Varianten:

1. Im Volumen eingebrachte Elektroden:

Die Glasabdeckung 7 wird komplett ersetzt durch eine Elektrode (d. h. eine dünne leitfähige Platte, vorzugsweise Edelstahl oder eloxiertes Aluminium). Statt dessen kann die dünne Abdeckung auch als dünne, vorzugsweise aus Glaskeramik gestaltete Platte sein, in die die Elektrode 14 integriert wird. Die Gegenelektrode wird gebildet wahlweise aus einer Elektrode 10 oder einer Elektrode 11 oder dem Abstandshalter 2 selbst. In diesem Fall würde der Abstandshalter 2 aus Edelstahl oder vorzugsweise aus eloxiertem Aluminium bestehen.

2. Die Elektroden werden außerhalb vom Volumen angeordnet.

Die Elektroden 12 und 13 sind außerhalb angeordnet. Auch Elektrode 11 kann außerhalb angeordnet sein. Alle Kombinationen der Elektrodengröße (wichtig z. B. für den zusätzlichen Sputtereffekt) sind möglich (auch bei Anordnung der Elektroden innerhalb des Volumens). Man kann auch im Volumen eingebrachte und außenliegende Elektroden miteinander kombinieren.

3. Die Energie kann kapazitiv oder induktiv eingekoppelt werden. Wegen des geringen Leistungsbedarfs wäre eine Einkoppelung der Energie mit Mikrowellen (mikrowelleninduziertes Plasma) vorteilhaft.

Der gleichzeitige Betrieb verschiedener Energieeinkoppelungen ist möglich (Hybridanordnung). Derzeitig gibt es aber nur Prototypen jeweils induktiver- und kapazitiver Energieeinkoppelung.

Wegen der Handhabung des kleinen Probenhalters wird dieser in einem flachen Zylinder oder anders geformten Halter 9 integriert der auf der Grundplatte G des Mikroskops aufgesetzt wird oder vorzugsweise in x-Richtung und y-Richtung frei (vorzugsweise motorisiert) bewegt werden kann. Er besteht vorzugsweise aus Glas oder Glaskeramik kann aber auch aus Metall vorzugsweise aus Messing bestehen.

Geeignete Aussparungen direkt in der Nähe des Plasmas sind vorzusehen um Energieeinkopplung zu verringern. Seine Bauhöhe (typisch 1 - 2 cm) wird zusätzlich zur Integration einer geeigneten Abschirmung als Schutz für die Sensorelektronik und des Mikroskops verwendet. Auch der Halter 9 selbst kann als Abschirmung dienen. Auf eine Abschirmung könnte ab je nach verwendetem Mikroskop auch verzichtet werden. Die Abmessungen des Halters 9 richten sich nach dem eingesetzten Mikroskop. Er hat die Abmessungen von typischerweise 14 cm x 14cm. Er verfügt vorzugsweise über eine Nut an seiner Unterseite, die mit einer Vakuumpumpe bzw. Druckluftpumpe verbunden werden kann. Somit kann nach dem Stand der Technik der Halter 9 durch ein Luftpolster zwischen der Grundplatte und dem Halter 9 leicht durch geeignete Verschiebeeinrichtungen vorzugsweise motorisiert bewegt werden. Andererseits wird der Halter 9 in der Messposition durch das Anlegen eines Vakuums

auf die Grundplatte G fixiert. Der Halter 9 könnte alternativ auch durch geeignete Klemmvorrichtungen auf die Grundplatte G in der interessierenden Messposition fixiert werden. Der Halter 9 ist vorzugsweise derart gestaltet, dass ein einfacher Austausch des Plasmabehälters ermöglicht wird. Dazu verfügt der Halter 9 über geeignete Vorrichtungen wie z. B. Klemmvorrichtungen und geeignete Aussparungen in die der Behälter einfach eingesetzt werden kann. Dies erlaubt die Nutzung verschiedener Plasmabehandlungsmethoden wie z. B. ICP und RIE (Fig. 3). Der Halter 9 kann Teile des Anpassnetzwerkes und/oder mechanische Teile zur Schliessung des Plasmavolumens mit einer dünnen Platte (mit langsamer Absenkung der Platte) oder eines speziellen abgeschrägten Verschlußdeckels und entsprechend abgeschrägten Plasmabehälters im einfachsten Fall des Zylinders 1 enthalten. Neben der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform der Schliessung des des Plasmavolumens ergeben sich weitere Ausführungsformen möglicher Verschlußmöglichkeiten, die das Ziel haben das Plasmavolumen zu schließen. Bei den Ausführungsformen soll gewährleistet sein, dass durch geeignete Anschläge die Position des Verschlußdeckels definiert ist und dass das Schließen des Plasmavolumen möglichst reibungsfrei und ruckfrei verläuft um mechanische Vibrationen und Änderungen der Position der Probe zu vermeiden. Mögliche Ausführungsformen der Schliessung des Plasmavolumens sollten die in Fig. 1 gezeigte oberflächennahe Positionierung der Probe 3 ermöglichen. Eine einfache Ausführung der Schliessung des Volumens kann durch eine Vorrichtung bewerkstelligt werden, die es ermöglicht vorzugsweise mit zwei dünnen Faden manuell oder vorzugsweise motorisiert eine Drehung des abgeschrägten Verschlußdeckels zu vollführen. Diese Vorrichtung kann vorzugsweise auf der Grundplatte auf der das Mikroskop aufgestellt ist positioniert werden (z. B. auf einem Anti-Vibrationstisch, nicht gezeichnet).

Die Energieeinkoppelung könnte möglicherweise mit Hilfe einer monolithisch miniaturisierten Plasmaquelle wie in Patent von Hopwood (Nr. 5,942,855) beschrieben ist bewerkstelligt werden. Eine veränderte (nicht im Patent beschriebene) dünne monolithische Quelle (d. h. ohne integrierte Plasmakammer) könnte in der dünnen Platte 7 integriert sein oder sie vollständig ersetzen. Alternativ könnte die Energie aber auch seitlich oder am Reaktorboden des Reaktors 1 eingekoppelt werden. Besteht der Reaktor aus Glas oder Glaskeramik kann auf ein Energieeinkoppelungsfenster verzichtet werden. Im Patent von Hopwood wird jedoch die Herstellung (Bonding-Technik) einer sehr stark miniaturisierten Quelle mit integrierter Plasmakammer beschrieben, die bei mehreren 100 MHz betrieben wird. Der Spulendurchmesser beträgt nur 0.4 cm und die Dicke der integrierten Plasmakammer beträgt nur 0.1 - 10 mm. Für viele Anwendungen ist jedoch diese starke Miniaturisierung nicht nötig und nicht erwünscht.

Alternativ könnte die Energieeinkoppelung auch mit Mikrowellen bewerkstelligt werden ([1], S. 147). Der Halter 9 kann Teile des Anpassnetzwerks und/oder mechanische Teile zur Schliessung des Plasmavolumens mit der dünnen Platte (mit

langsamer mechanischen Absenkung der Platte (z. B. hydraulisch) oder des speziellen abschragten Verschlussdeckels enthalten. Überstehende Aufbauten auf dem Halter 9 sind jedoch nach Möglichkeit zu vermeiden, da dies bei unsachgemäßer Bewegung des Halters 9 die Sonde bzw. den Sonderhalter beschädigen könnte. Der Probenhalter mit integriertem Plasma kann optional gekühlt werden. Eine thermische „Belastung“ einer gegen Erwärmung empfindlichen Probe 3 kann durch den Einsatz von optimierten Energieeinkopplungssystemen mit niedriger Verlustleistung vermieden bzw. minimiert werden. Falls dies technisch nicht oder nur unzureichend durchführbar ist, sollten insbesondere bei einer längeren Behandlungszeit, die sich erwärmenden Komponenten aktiv oder passiv gekühlt werden. Verschiedene Kühlungsanordnungen nach dem Stand der Technik stehen zur Verfügung wie z. B. eine Luftkühlung mit geeigneten Ventilatoren oder das Kühlen mit Flüssigkeiten. Im einfachsten Fall einer induktiven Energieeinkopplung wird die Spule 6 mit Luft oder Wasser gekühlt. Auch eine Kühlung des Plasmabehälters von Außen mit Schläuchen z. B. bestehend aus flexiblem Material, die um den Probenhalter geführt werden können, ist einfach zu bewerkstelligen. Weiterhin kann der Probenhalter mit integriertem Plasma mit Entladungseinrichtungen ausgerüstet sein. Die Probe 3 und insbesondere der Probenträger (z. B. leitfähiges Silizium) können sich durch die Plasmabehandlung aufladen. Um Potentialunterschiede zwischen der Oberfläche der Probe 3 und der Mess-Sonde S (z. B. AFM-Spitze) auszugleichen, ist die Probe geerdet. Dazu wird die Probe mit einem dünnen Draht, der vorzugsweise innerhalb des Abstandshalters in einer kleinen Bohrung nach außen geführt wird, geerdet. Alternativ kann in die Verschlusseinrichtung ein dünner Draht derart befestigt sein, dass er beim Verschließen des Plasmavolumens die Oberfläche der Probe berührt und somit automatisch erdet. Dazu könnten sich Kohlefasern besonders eignen oder dünne Kupferdrähte. Im Halter 9 sind vorzugsweise auch Einrichtungen integriert die zur Kontrolle der Positionen des Verschlussdeckels und der Position der Sonde geeignet sind. Vorzugsweise sind das flexibel einsetzbare optische Überwachungssysteme nach dem Stand der Technik die vorzugsweise berührungslos mit Licht arbeiten.

Vorteile der Erfindung

Die Erfindung liefert eine kostengünstige und einfache Möglichkeit vorhandene Mikroskope mit der Option einer *in situ* Plasmabehandlung von einer Probenoberfläche zu unterziehen.

Die Messzeit insbesondere bei einer zyklischen Behandlung mit Plasma und anschließender Abrasterung würde stark verkürzt, da das Auffinden der selben Stelle entfällt. Die Repositionierung wird üblicherweise durch zunächst optische Orientierung an makroskopischen Objekten oder Defekten wie z. B. Staubpartikel und dann durch sukzessives hineinzoomen mit der Rastersondenmikroskopie bewerkstellt.

[16]. Je nach Qualität der Verschiebeeinheit in z-Richtung des Mikroskops wären noch minimale Korrekturen nötig, die aber mit den Scanneinheiten nach dem Stand der Technik zu bewerkstelligen sind. Es bestünde die Möglichkeit der automatischen Korrektur durch Vergleich der Bilder vor und nach einer Plasmabehandlung mit Hilfe von Bilderkennungs-, Bildauswertesoftware. Voraussetzung dafür ist aber die sichere Wiederfindung eines Objekts oder mehrerer im gescannten Bild.

Die minimale Bewegung der Sonde in z-Richtung und damit die nur sehr kleinen zu erwartenden Fehler bei erneuten abscannen der Probe sind inherent aus geometrischen Gründen bei der Erfindung gegeben [Fig. 4].

Die Erfindung könnte als Option für vorhandene Mikroskope vermarktet werden und würde so vorhandene Mikroskope aufwerten. Das Abdecken des Probenhaltes mit der Platte 7 kann einfach automatisiert werden und in den Halter H integriert werden. Der Probenhalter mit integriertem Plasma kann je nach der Bauform des im jeweiligen Mikroskop eingesetzten X/Y -Verschiebetisches auf diesen Aufsetzen typischerweise ersetzen aber vollständig ersetzen. Übliche und kostengünstige RF-Technik zur Energieeinkoppelung kann verwendet werden. Je nach Bauform der Spule unterstützt die Reaktorgeometrie die Anbringung der Spule so weit wie möglich entfernt von der Sonde S (Abschirmungsmöglichkeiten).

Die Energieeinkoppelung mit Mikrowellen und Hybridformen sollte auch möglich sein.

Die Erfindung erlaubt das Vermeiden des Einsatzes von sehr teuren, hochgenauen und geregelten Positioniersystemen, die eine Genauigkeit im sub-Mikrometerbereich aufweisen. Die Zu- und Abführungen von dem Einlass 4 und Auslass 5 können mit flexiblen Schläuchen vorzugsweise aus PTFE realisiert werden, so dass man den Probenhalter mit integriertem Plasma in der x- und y-Richtung z. B. mit Hilfe von Schrittmotoren-bewegt werden kann. Auch eine manuelle (nicht motorisierte) Verschiebung wäre möglich, da vor allem eine einmal ausgewählte Stelle der Probenoberfläche interessiert.

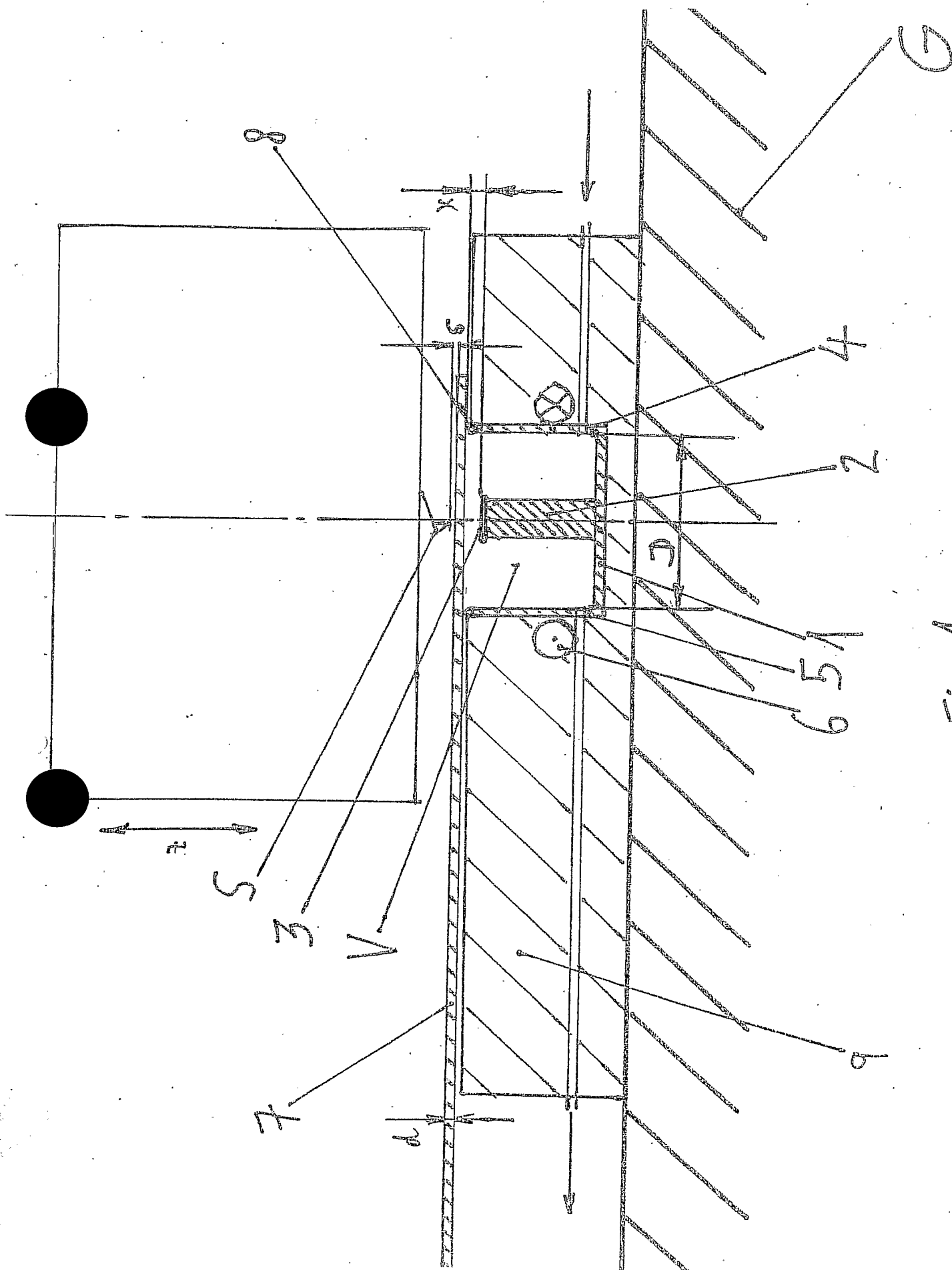
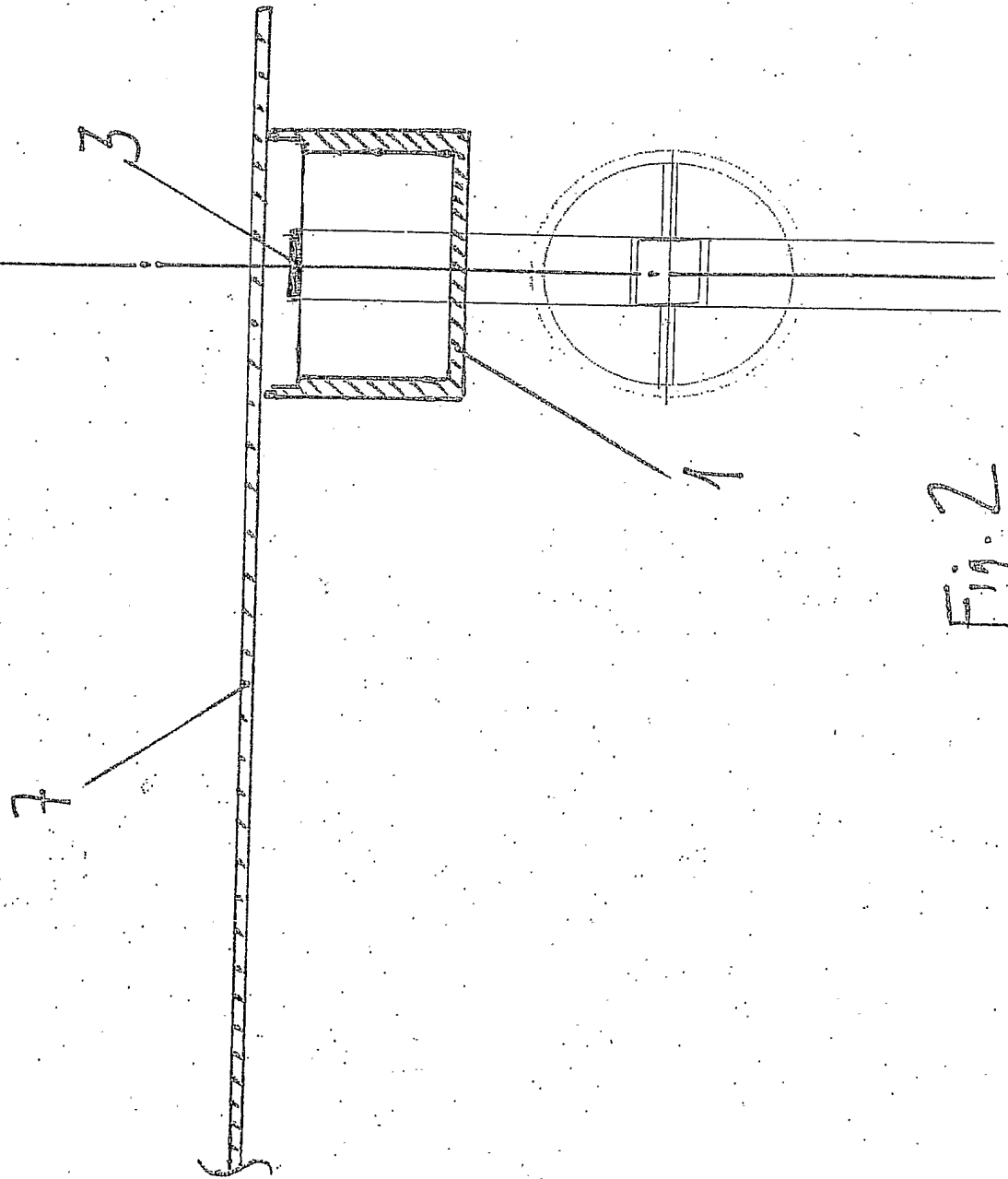


Fig. 1

Fig. 2

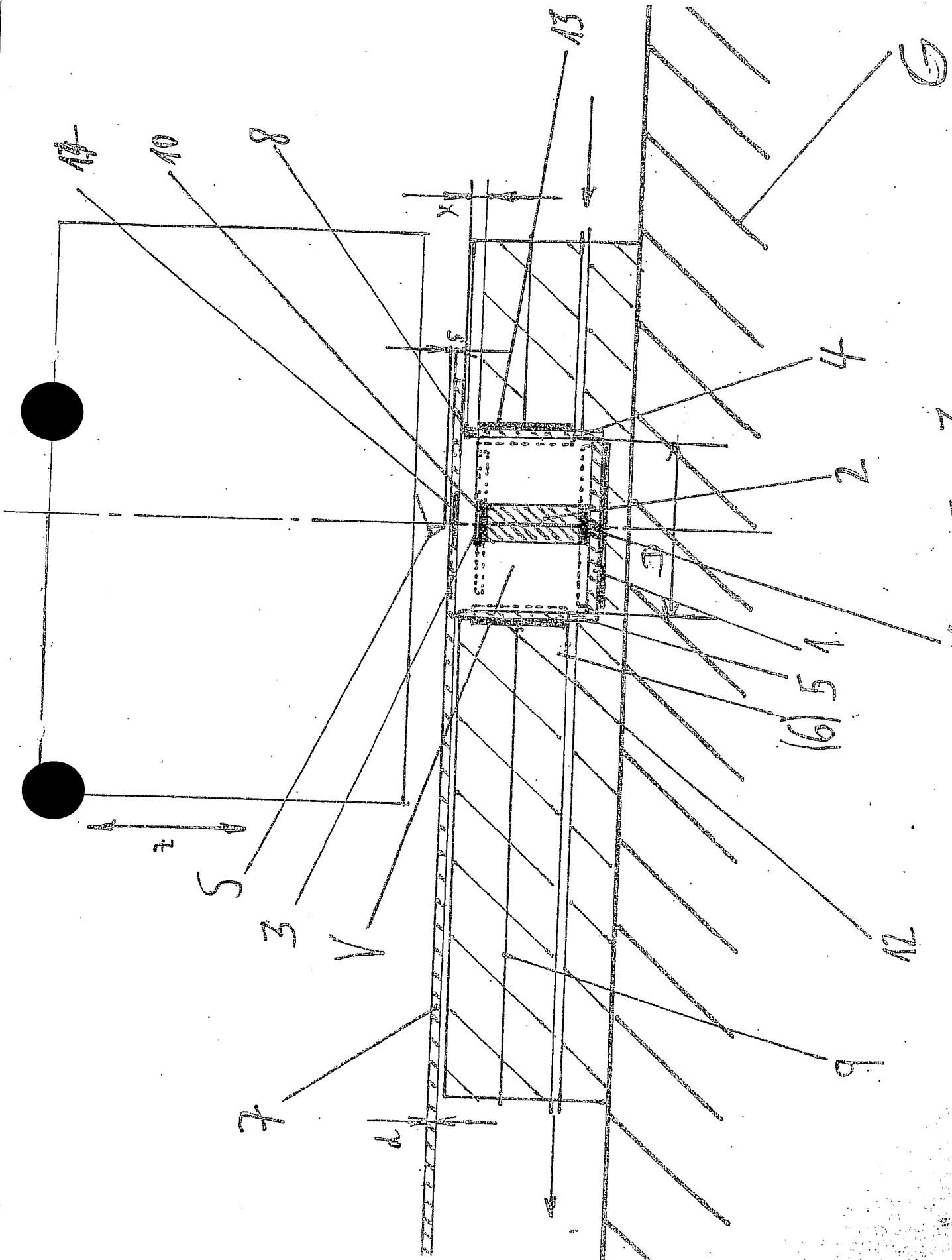
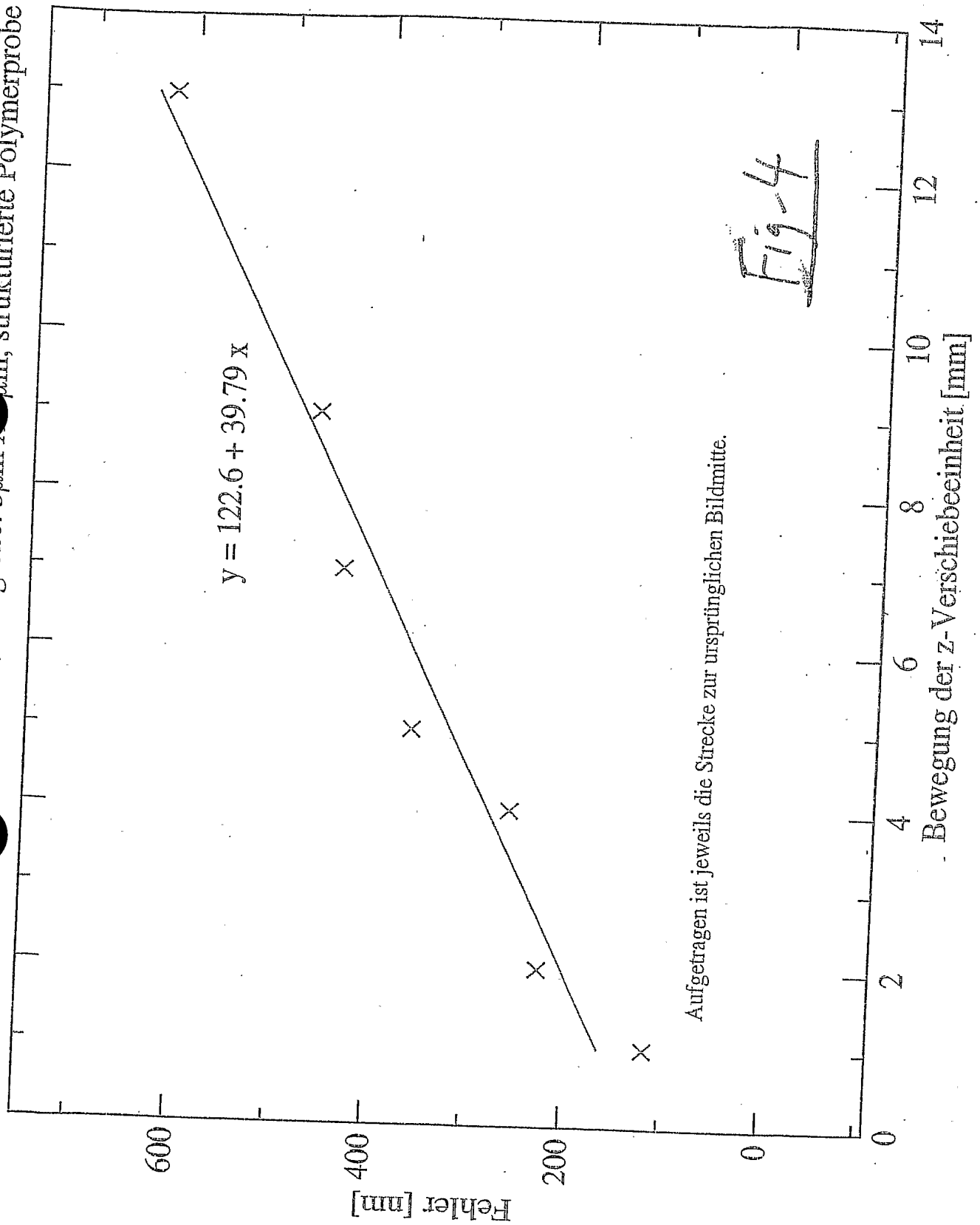


Fig. 3

AFM: D3100M, Veeco Instruments, Bildgröße: $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$, strukturierte Polymerprobe



Teil III:

Flachspule zur Energieeinkopplung in eine Miniatur-Plasmakammer

Derzeitiger Stand der Technik und damit verbundene Nachteile

Die Erfindung bezieht sich auf eine miniaturisierte HF-Spule für die Energieeinkopplung in eine Miniatur-Plasmakammer zur Erzeugung eines elektromagnetischen Feldes. Bereits vorhandene Anlagen zur Plasmaerzeugung sind für bestimmte Applikationen (siehe „Verfahren und Vorrichtung zum Zünden und Beheizen von einem stationären oder beweglichen kleinen Plasma“ und „Probenhalter mit integriertem Plasma“) zu groß dimensioniert. Die verwendeten Frequenzen liegen üblicherweise bei 13.56 MHz. Es sind keine entsprechenden miniaturisierten Flachspulen für Frequenzen im 27 MHz-Bereich mit entsprechender Resonanzabstimmung und HF-Leistung bekannt. Eine Anwendung im UHF-Bereich, wo kleine Abmessungen leichter möglich sind, sind durch den offenen Aufbau der Plasmakammer (siehe „Probenhalter mit integriertem Plasma“ wegen der hohen Strahlungsdichte (gesundheitliche Gefahren für den Anwender) und den Funktionsstörungen nicht durchführbar.

Wo liegt das Problem?

In einer Miniatur-Plasmakammer soll ein Plasma erzeugt werden. Die Einkopplung der Energie hierfür soll berührungslos erfolgen. Es soll möglichst wenig Energie in Wärme umgewandelt werden. Die mechanische Abmessung muss der Größe der Kammer angepasst sein. Die Arbeitsfrequenz soll bei 27 MHz liegen. Die HF-Leistung kann bis 25 W betragen.

Lösung des technischen Problems, durch die Erfindung; Angaben zu technischen Merkmalen/Mitteln.

Für die Wicklung der Spule wird ein Kupferdraht mit rechteckigem Querschnitt gewählt. Dadurch werden folgende Forderungen erfüllt:

- Der Durchmesser der gesamten Spule wird gegenüber rundem Draht bei gleichem Querschnitt geringer (mechanische Abmessungen).
- Ein rechteckiger Draht hat bei gleichem Querschnitt eine größere Oberfläche als runder Draht. Durch die größere Oberfläche werden Leistungsverluste durch Auftreten des Skin效kts verringert.

- Die Spule soll HF-Leistungen bis 25 W übertragen können, somit entstehen in der Einkoppelspule große Ströme. Durch die großen Ströme entsteht Wärme, die an der Plasmakammer unerwünscht ist.
- Da bedingt durch den Strom ein möglichst großer Drahtdurchmesser genommen werden sollte, aber die mechanischen Abmessungen der Spule klein sein müssen, wird ein Querschnitt des Spulendrahts von max. 3 mm² gewählt.

Der Schwingkreis (Spule und Kondensator) muss auf die Resonanzfrequenz (27.12 MHz) abgestimmt werden können. Dadurch entstehen sehr hohe Kreis-spannungen (einige 100 V) in der Schwingkreisspule. Diese hohen Spannungen muss auch der Schwingkreiskondensator aushalten können. Da HF-Leistung bis 25 W übertragen werden soll, muss auch der Schwingkreiskondensator hohe Ströme vertragen können.

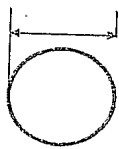
Wiederum muß der Kondensator abstimmbar sein und darf mechanisch nicht groß werden. Diese Forderungen werden wie folgt gelöst:

- Der Kondensator wird mechanisch parallel zur Spannungszuführung zu der Spule angebracht.
- Als Dielektrikum wird ein Keramik-Rohr verwendet.
- Als zweite Platte des Kondensators wird ein verschiebbares Metallrohr verwendet. Die Spule wird einschließlich des Kondensators mit Keramik-Gießmasse verkleidet. Dadurch wird die Spule mechanisch stabil, der Anwender wird vor den hohen Spannungen geschützt und die entstehende Wärme wird, bedingt durch die Verlustleistung, abgeführt.

Literatur

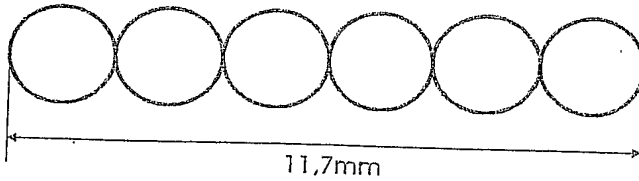
Antennenbuch, Rommel Karl

Runder Querschnitt

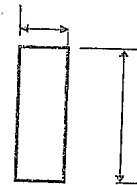


$$\begin{aligned} d &= 1,95\text{mm} \\ A &= 2,99\text{mm}^2 \\ U &= 6,13\text{mm} \end{aligned}$$

6 Windungen nebeneinander



Rechteckiger Querschnitt



$$\begin{aligned} a &= 1\text{mm} \\ b &= 3\text{mm} \\ A &= 3\text{mm}^2 \\ U &= 8\text{mm} \end{aligned}$$

6 Windungen nebeneinander

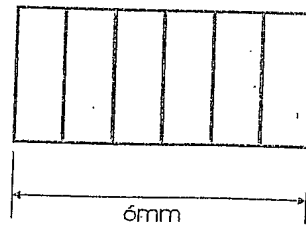


Fig. 1 Drahtstärken

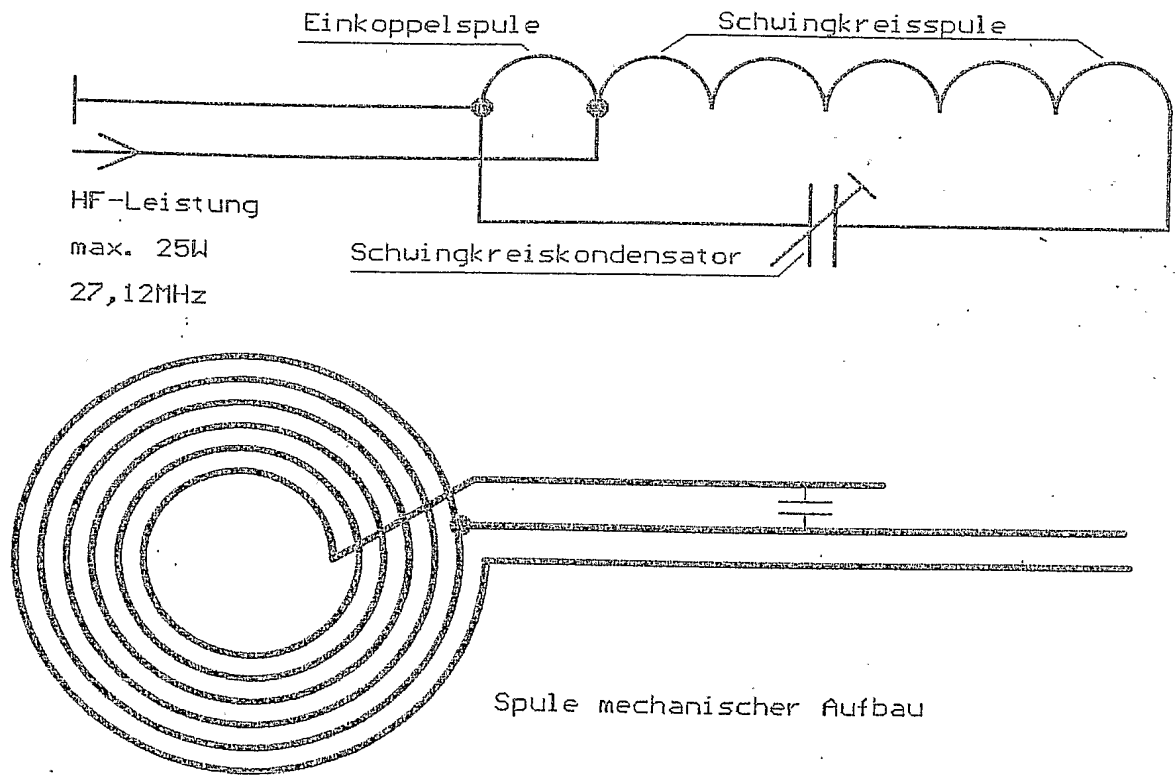


Fig. 2 Flachspule

Literatur

- [1] Michael Köhler: Ätzverfahren für die Mikrotechnik, WILEY-VCH-Verlag, 1998.
- [2] Y. Yin, J. Messier, and J. Hopwood: Miniaturization of Inductively Coupled Plasma Sources, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 27(5), 1516-1524 (1999).
- [3] MKS (www.mksinst.com und www.mksinst.com/enihome.html)
- [4] Harrick (www.harricksci.com)
- [5] Hamamatsu (www.hamamatsu.de/mpm/mpm.html)
- [6] March (www.marchplasma.com)
- [7] Tegal (www.tegal.com)
- [8] Triontech (www.triontech.com)
- [9] Fischione (www.fischione.com)
- [10] Appliedmaterials (www.appliedmaterials.com)
- [11] Oxford (www.oxfordplasma.de)
- [12] Orbis (www.orbitech.co.uk)
- [13] Semicore (www.semicore.com)
- [14] Plassys (www.plassys.com/plassyse/index.htm)
- [15] SPI <http://www.2spi.com/catalog/instruments/etchers.html>
- [16] Advanced Surface Microscopy – Phase friction comparison:
(<http://www.asmicro.com/phzfrict.html>)